

**MARTHA ANDREIA BRAND**

**QUALIDADE DA BIOMASSA FLORESTAL PARA O USO NA GERAÇÃO DE  
ENERGIA EM FUNÇÃO DA ESTOCAGEM**

**Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Florestais, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências Florestais.**

**Orientadora: Profa. Dra. Graciela Inês Bolzon de Muñiz**

**CURITIBA**

**2007**



Universidade Federal do Paraná  
Setor de Ciências Agrárias - Centro de Ciências Florestais e da Madeira  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal**

**PARECER**

Defesa nº. 691

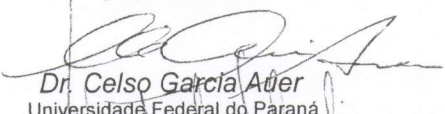
A banca examinadora, instituída pelo colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, após arguir o(a) doutorando(a) *Martha Andréia Brand* em relação ao seu trabalho de tese intitulado "**Qualidade da biomassa florestal para uso na geração de energia em função da estocagem**", é de parecer favorável à **APROVAÇÃO** do(a) acadêmico(a), habilitando-o(a) ao título de *Doutor* em Engenharia Florestal, área de concentração em **TECNOLOGIA E UTILIZAÇÃO DE PRODUTOS FLORESTAIS**.

  
Dr. José Dilcio Rocha

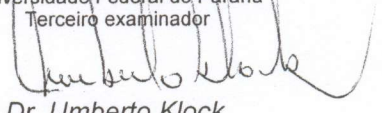
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP  
Primeiro examinador

  
Dr. Waldir Ferreira Quirino

IBAMA  
Segundo examinador

  
Dr. Celso Garcia Adler

Universidade Federal do Paraná  
Terceiro examinador

  
Dr. Umberto Klock

Universidade Federal do Paraná  
Quarto examinador

  
Dr. Graciela Ines Bolzon de Muniz

Universidade Federal do Paraná  
Orientador e presidente da banca examinadora

Curitiba, 15 de fevereiro de 2007.

  
Graciela Ines Bolzon de Muniz

Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal

Antonio Carlos Batista

Vice-coordenador do curso

A uma aula de ciências, ainda no ensino fundamental, onde aprendi que as árvores nos acompanham do berço ao túmulo, que nos dão sombra, alimento, proteção, energia...

Dedico

## **AGRADECIMENTOS**

Às empresas Tractebel Energia S.A., Battistella Indústria e Comércio Ltda. e Klabin S.A, e instituições Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de Santa Catarina (FAPESC), Universidade do Planalto Catarinense (UNIPLAC) e Empresa de Pesquisa Agropecuária de Santa Catarina (EPAGRI), pelo apoio financeiro e técnico dados ao trabalho.

A empresa Tractebel Energia S.A. foi a principal financiadora do projeto, juntamente com a Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de Santa Catarina (FAPESC) e a Universidade do Planalto Catarinense (UNIPLAC).

A empresa Battistella Indústria e Comércio Ltda. participou através da seção do espaço físico para a instalação do experimento e fornecimento de biomassa para a realização das análises.

A empresa Klabin S.A. forneceu biomassa para o experimento e realizou o transporte desta até o local de implantação do experimento.

A Empresa de Pesquisa Agropecuária de Santa Catarina (EPAGRI) forneceu os dados meteorológicos do período em que o estudo foi desenvolvido.

Aos meus queridos colegas e amigos Eduardo Bittencourt e Flávio José Simioni pelas incontáveis leituras e correções de minha tese.

A Tecnóloga da Madeira Juliana de Oliveira e aos bolsistas do Curso de Engenharia Industrial Madeireira da UNIPLAC pelo apoio na realização das coletas e análises de laboratório.

Aos professores José Otávio Brito, Waldir Ferreira Quirino e Graciela Inês Bolzon de Muñiz, membros de meu comitê orientador, que se dedicaram e acompanharam minha caminhada no desenvolvimento do trabalho.

## **BIOGRAFIA DA AUTORA**

Martha Andreia Brand, filha de Lydia Neppel Brand e Ewaldo Carlos Brand, nasceu em 19 de março de 1974, em Irineópolis, Estado de Santa Catarina.

Concluiu o ensino fundamental no Colégio Estadual Horácio Nunes, em Irineópolis - SC, em 1987.

Concluiu o ensino médio, Técnico em Agropecuária, no Colégio Agrícola Vidal Ramos, em Marcílio Dias - SC, em 1990.

Trabalhou como professora de Iniciação ao Trabalho no Colégio Estadual Horácio Nunes, em Irineópolis, no período de julho a dezembro de 1992.

Ingressou no curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná em 1993.

Participou do Programa Especial de Treinamento (PET) da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), de Engenharia Florestal – UFPR, entre março de 1995 a março de 1998.

Graduou-se como Engenheiro Florestal, pela Universidade Federal do Paraná, em março de 1998.

Ingressou no Curso de Pós Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal do Paraná, nível Mestrado, área de concentração Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais em março de 1998.

Trabalhou como Engenheiro Florestal na Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná, em Curitiba, Paraná, no período de junho de 1998 a abril de 2000.

Obteve o título de Mestre em Engenharia Florestal, em 29 de novembro de 2000, com a dissertação intitulada “Rendimento do processo produtivo e energético da matéria-prima de uma indústria de base florestal”.

Iniciou suas atividades docentes em março de 2000, na Universidade do Planalto Catarinense, em Lages - SC. Inicialmente atuou no Curso de Tecnologia da Madeira, entre os anos de 2000 a 2002. Em 2001, passou a atuar também no Curso de Engenharia Industrial Madeireira.

Desde então vem desenvolvendo atividades de ensino, pesquisa e extensão nas áreas de Qualidade da Madeira e Energia da Biomassa Florestal, tendo ministrado as

disciplinas de Anatomia e Identificação de Madeiras, Princípios e Utilização de Produtos Florestais; Secagem da Madeira; Biodegradação e Preservação da Madeira, Transformação Mecânica; Química da Madeira; Botânica; Dendrologia e Propriedades e Produtos Energéticos da Madeira.

Foi docente do Curso de Especialização em Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais, convênio Universidade do Planalto Catarinense e Universidade Federal do Paraná, em 2002, na disciplina de Anatomia e Identificação de Madeiras.

Foi Suplente de Coordenação do Curso de Tecnologia da Madeira, entre 2000 a 2002, passando a ser coordenadora do referido curso entre 2002 a 2004. Neste mesmo período acumulou a coordenação do Curso de Engenharia Industrial Madeireira. De 2004 a 2006 foi Suplente de Coordenação do Curso de Engenharia Industrial Madeireira da Universidade do Planalto Catarinense.

Participou do Grupo de Pesquisa Desenvolvimento e Tecnologia da Indústria de Base Florestal entre os anos de 2001 a 2003, quando passou a integrar o Grupo de Pesquisa Energia e Simulação Numérica, nas linhas de pesquisa de Qualidade da Madeira e Energia de Biomassa Florestal.

Ingressou no Curso de Pós Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal do Paraná, nível Doutorado, área de concentração Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais, em março de 2003.

Participou como coordenadora e pesquisadora em 16 projetos de pesquisa, entre 2000 a 2006, tendo até o momento 12 artigos completos publicados em periódicos; dois capítulos de livro; nove trabalhos completos e 32 resumos publicados em anais de congressos. Orientou cinco trabalhos de monografias em Cursos de Especialização; dессesseis trabalhos de conclusão de curso e nove trabalhos de iniciação científica.

## **EPÍGRAFE**

A partir do processo de observação do cenário econômico do município de Lages, por extensão, de toda a região serrana, é possível observar que a vocação regional tem seu potencial na atividade madeireira. Virar as costas para esta realizada é o mesmo que contribuir para a perpetuação do estágio de sub-desenvolvimento e estagnação em que a região se encontra no momento.

Ezequiel de Oliveira Nascimento e Munir Saleh

Os processos empírico-analíticos são necessários como preliminares, embora não sejam suficientes como solução definitiva.

Albert Einstein

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	xiv
RESUMO.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 1 - INFLUÊNCIA DO TEMPO DE ESTOCAGEM SOBRE A QUALIDADE DA BIOMASSA FLORESTAL PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA.....	6
RESUMO.....	6
ABSTRACT.....	6
1 INTRODUÇÃO.....	7
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	8
3 MATERIAL E MÉTODOS .....	15
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	19
4.1 Teor de umidade.....	19
4.2 Composição química da madeira com casca.....	22
4.3 Poder calorífico.....	32
4.4 Teor de cinzas.....	37
5 CONCLUSÕES.....	38
6 REFERÊNCIAS.....	39
CAPÍTULO 2 - INFLUÊNCIA DA ÉPOCA DE COLHEITA E DE ESTOCAGEM SOBRE A QUALIDADE DA BIOMASSA FLORESTAL PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA.....	43
RESUMO.....	43
ABSTRACT.....	43
1 INTRODUÇÃO.....	44
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	46
2.1 Influência da época de colheita sobre as propriedades da biomassa florestal.....	46
2.2 Influência da época de estocagem sobre as propriedades da biomassa florestal.....	49
3 MATERIAL E MÉTODOS .....	52
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	56
4.1 Influência da época de colheita sobre as propriedades da biomassa florestal.....	56
4.2 Influência da época de estocagem sobre as propriedades da biomassa florestal.....	66
5 CONCLUSÕES.....	79
5.1 Quanto à época de colheita.....	79
5.2 Quanto à época de estocagem.....	79
6 REFERÊNCIAS.....	80
CAPÍTULO 3 - VARIAÇÃO DA QUALIDADE DA BIOMASSA FLORESTAL DURANTE A ESTOCAGEM, EM FUNÇÃO DA ESPÉCIE E TIPO DO MATERIAL .....	84
RESUMO.....	84
ABSTRACT.....	84
1 INTRODUÇÃO.....	85
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	86
2.1 Influência da espécie que dá origem à biomassa florestal na qualidade do material sob estocagem.....	86
2.2 Influência da forma e tamanho da biomassa florestal na qualidade do material sob estocagem.....	89
3 MATERIAL E MÉTODOS .....	93
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	97
4.1 Teor de umidade.....	97
4.2 Composição química.....	99
4.3 Poder calorífico.....	105



4.4 Teor de cinzas.....	109
5 CONCLUSÕES.....	111
6 REFERÊNCIAS.....	112
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	116
GLOSSÁRIO.....	120
REFERÊNCIAS.....	122
APÊNDICE I – FOTOS DO LOCAL DO EXPERIMENTO .....	127
APÊNDICE 2 – ANÁLISES ESTATÍSTICAS DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS EXPERIMENTOS.....	131

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1 – Condições climáticas da região de Lages – SC (outubro de 2003 a fevereiro de 2005)...	15
TABELA 1.2 – Delineamento experimental para análise da influência do tempo de estocagem sobre a qualidade da biomassa florestal.....	17
TABELA 2.1 – Condições climáticas da região de Lages- outubro de 2003 a fevereiro de 2005.....	53
TABELA 2.2 – Delineamento experimental da estocagem de biomassa florestal em função da época de colheita e de estocagem.....	54
TABELA 2.19 – Teor de umidade na base úmida de toras de Pinus e Eucalyptus e costaneira de Pinus em função da época de estocagem.....	67
TABELA 2.22 – Solubilidade em água fria de toras com casca de Pinus e Eucalyptus e costaneira de Pinus em função da época de estocagem.....	70
TABELA 2.25 – Solubilidade em água quente de toras com casca de Pinus e Eucalyptus e costaneira de Pinus em função da época de estocagem.....	70
TABELA 2.28 – Comportamento da solubilidade da madeira em hidróxido de sódio de cada lote em relação à época de estocagem do material .....	73
TABELA 2.31 – Poder calorífico superior de toras de Pinus e Eucalyptus e costaneira de Pinus em função da época de estocagem.....	74
TABELA 2.34 - Poder calorífico líquido de toras de Pinus e Eucalyptus e costaneira de Pinus em função da época de estocagem.....	76
TABELA 2.37 – Teor de cinzas da madeira de toras de Pinus e Eucalyptus e costaneira de Pinus em função da época de estocagem.....	78
TABELA 3.1 – Condições climáticas na região de Lages - outubro de 2003 a fevereiro de 2005 .....	94
TABELA 3.2 – Delineamento experimental adotado para a análise do efeito da estocagem sobre a qualidade da biomassa florestal .....	95
TABELA 3.5 - Variação do teor de umidade na base úmida, em função da espécie e do tamanho e forma da biomassa florestal.....	98
TABELA 3.10 - Variação da solubilidade da madeira com casca em água fria, em função da espécie e do tamanho e forma da biomassa florestal.....	100
TABELA 3.15 - Variação da solubilidade da madeira com casca em água quente, em função da espécie e do tamanho e forma da biomassa florestal.....	102
TABELA 3.20 - Variação da solubilidade da madeira com casca em hidróxido de sódio, em função da espécie e do tamanho e forma da biomassa florestal.....	104
TABELA 3.25 – Variação do poder calorífico superior, em função da espécie e do tamanho e forma da biomassa florestal.....	106
TABELA 3.30 - Variação do poder calorífico líquido, em função da espécie e do tamanho e forma da biomassa florestal.....	108
TABELA 3.35 - Variação do teor de cinzas da madeira com casca, em função da espécie e do tamanho e forma da biomassa florestal.....	110
TABELA 1.3 - Teste F para o teor de umidade na base úmida em função do tempo de estocagem...	132
TABELA 1.4 – Variação no teor de umidade na base úmida da biomassa florestal em função do tempo de estocagem (Teste de médias de Tukey).....	132
TABELA 1.5 - Teste F para a solubilidade da madeira com casca em água fria em função do tempo de estocagem.....	132
TABELA 1.6 – Variação da solubilidade da madeira com casca em água fria em relação ao tempo de estocagem da biomassa florestal (Teste de médias de Tukey).....	132
TABELA 1.7 - Teste F para a solubilidade da madeira com casca em água quente em função do tempo de estocagem.....	132
TABELA 1.8 – Variação da solubilidade da madeira com casca em água quente em relação ao tempo de estocagem da biomassa florestal (Teste de médias de Tukey).....	133
TABELA 1.9 - Teste F para a solubilidade da madeira com casca em hidróxido de sódio em função do tempo de estocagem.....	133

TABELA 1.10 – Variação da solubilidade da madeira com casca em hidróxido de sódio em relação ao tempo de estocagem da biomassa florestal (Teste de médias de Tukey).....	133
TABELA 1.11 - Teste F para o poder calorífico superior em função do tempo de estocagem.....	133
TABELA 1.12 – Variação no poder calorífico superior em relação ao tempo de estocagem da biomassa florestal (Teste de médias de Tukey).....	134
TABELA 1.13 - Teste F para o poder calorífico líquido em função do tempo de estocagem.....	134
TABELA 1.14 – Variação no poder calorífico líquido em relação ao tempo de estocagem da biomassa florestal (Teste de médias de Tukey).....	134
TABELA 1.15 - Teste F para o teor de cinzas da madeira com casca em função do tempo de estocagem.....	134
TABELA 1.16 – Variação do o teor de cinzas da madeira com casca em relação ao tempo de estocagem da biomassa florestal (Teste de médias de Tukey).....	135
TABELA 2.3 – Teste F para o teor de umidade na base úmida em função da época de colheita.....	135
TABELA 2.4 – Variação no teor de umidade na base úmida em relação à época de colheita da biomassa florestal (Teste de médias de Tukey).....	135
TABELA 2.5 – Teste F para a solubilidade da madeira em água fria em função da época de colheita.....	135
TABELA 2.6 - Variação da solubilidade em água fria da biomassa florestal, em relação à época de colheita (Teste de médias de Tukey).....	136
TABELA 2.7 – Teste F para a solubilidade em água quente da biomassa florestal em função da época de colheita.....	136
TABELA 2.8 - Variação da solubilidade em água quente da biomassa florestal, em relação à época de colheita (Teste de médias de Tukey).....	136
TABELA 2.9 – Teste F para a solubilidade em hidróxido de sódio em função da época de colheita.....	136
TABELA 2.10 – Variação na solubilidade em hidróxido de sódio da biomassa florestal, em relação à época de colheita (Teste de médias de Tukey).....	137
TABELA 2.11 – Teste F para o poder calorífico superior em função da época de colheita.....	137
TABELA 2.12 - Variação no poder calorífico superior da biomassa florestal, em relação à época de colheita.....	137
TABELA 2.13 – Teste F para o poder calorífico líquido em função da época de colheita.....	137
TABELA 2.14 - Variação no poder calorífico líquido da biomassa florestal, em relação à época de colheita (Teste de médias de Tukey).....	138
TABELA 2.15 – Teste F para o teor de cinzas da biomassa florestal em função da época de colheita.....	138
TABELA 2.16 – Variação do teor de cinzas da biomassa florestal, em relação à época de colheita.....	138
TABELA 2.17 - Teste F para o teor de umidade na base úmida da biomassa florestal em função da época de estocagem.....	138
TABELA 2.18 - Variação no teor de umidade na base úmida da biomassa florestal em relação à época de estocagem (Teste de médias de Tukey).....	139
TABELA 2.20 - Teste F para a solubilidade em água fria da biomassa florestal em função da época de estocagem.....	139
TABELA 2.21 – Variação na solubilidade em água fria da biomassa florestal em relação à época de estocagem (Teste de médias de Tukey).....	139
TABELA 2.23 - Teste F para a solubilidade em água quente da biomassa florestal em função da época de estocagem.....	139
TABELA 2.24 – Variação na solubilidade em água quente da biomassa florestal em relação à época de estocagem da biomassa florestal (Teste de médias de Tukey).....	140
TABELA 2.26 - Teste F para a solubilidade em hidróxido de sódio da biomassa florestal em função da época de estocagem.....	140
TABELA 2.27 – Variação na solubilidade em hidróxido de sódio da biomassa florestal em relação à época de estocagem (Teste de médias de Tukey).....	140
TABELA 2.29 - Teste F para o poder calorífico superior da biomassa florestal em função da época de estocagem.....	140

TABELA 2.30 – Variação no poder calorífico superior da biomassa florestal em relação à época de estocagem (Teste de médias de Tukey).....	141
TABELA 2.32 - Teste F para o poder calorífico inferior da biomassa florestal em função da época de estocagem.....	141
TABELA 2.33 – Variação no poder calorífico líquido da biomassa florestal em relação à época de estocagem (Teste de médias de Tukey).....	141
TABELA 2.35 - Teste F para o teor de cinzas da biomassa florestal em função da época de estocagem..	141
TABELA 2.36 – Variação no teor de cinzas da biomassa florestal em relação à época de estocagem (Teste de médias de Tukey).....	142
TABELA 3.3 - Teste F para o teor de umidade na base úmida da madeira com casca em função da espécie e do tamanho e forma da biomassa florestal.....	142
TABELA 3.4 – Variação do o teor de umidade na base úmida da madeira em função da espécie e e do tamanho e forma da biomassa florestal (Teste de médias de Tukey).....	142
TABELA 3.6 - Teste F para o teor de umidade na base úmida da madeira com casca de diferentes espécies e do tamanho e forma da biomassa florestal, em função do tempo de estocagem.....	142
TABELA 3.7 – Variação do o teor de umidade na base úmida da madeira com casca de diferentes espécies e do tamanho e forma da biomassa florestal, em função do tempo de estocagem (Teste de médias de Tukey).....	143
TABELA 3.8 - Teste F para a solubilidade da madeira com casca em água fria em função da espécie e do tamanho e forma da biomassa florestal.....	143
TABELA 3.9 – Variação a solubilidade da madeira com casca em água fria em função da espécie e do tamanho e forma da biomassa florestal (Teste de médias de Tukey).....	144
TABELA 3.11 - Teste F para a solubilidade da madeira com casca em água fria de diferentes espécies e do tamanho e forma da biomassa florestal, em função do tempo de estocagem.....	144
TABELA 3.12 – Variação da solubilidade da madeira com casca em água fria de diferentes espécies e do tamanho e forma da biomassa florestal, em função do tempo de estocagem (Teste de médias de Tukey). continua.....	144
TABELA 3.12 – Variação da solubilidade da madeira com casca em água fria em diferentes espécies e do tamanho e forma da biomassa florestal, em função do tempo de estocagem (teste de média de tukey). conclusão.....	145
TABELA 3.13 - Teste F para a solubilidade da madeira com casca em água quente em função da espécie e do tamanho e forma da biomassa florestal.....	145
TABELA 3.14 – Variação a solubilidade da madeira com casca em água quente em função da espécie e do tamanho e forma da biomassa florestal (Teste de médias de Tukey).....	145
TABELA 3.16 - Teste F para a solubilidade da madeira com casca em água quente de diferentes espécies e do tamanho e forma da biomassa florestal, em função do tempo de estocagem.....	145
TABELA 3.17 – Variação da solubilidade da madeira com casca em água quente de diferentes espécies e do tamanho e forma da biomassa florestal, em função do tempo de estocagem (Teste de médias de Tukey).....	146
TABELA 3.18 - Teste F para a solubilidade da madeira com casca em hidróxido de sódio em função da espécie e do tamanho e forma da biomassa florestal.....	146
TABELA 3.19 – Variação a solubilidade da madeira com casca em hidróxido de sódio em função da espécie e do tamanho e forma da biomassa florestal (Teste de médias de Tukey).....	146
TABELA 3.21 - Teste F para a solubilidade da madeira com casca em hidróxido de sódio de diferentes espécies e do tamanho e forma da biomassa florestal, em função do tempo de estocagem.....	147
TABELA 3.22 – Variação da solubilidade da madeira com casca em hidróxido de sódio de diferentes espécies e do tamanho e forma da biomassa florestal, em função do tempo de estocagem (Teste de médias de Tukey).....	147
TABELA 3.23 - Teste F para o poder calorífico superior da madeira com casca em função da espécie e do tamanho e forma da biomassa florestal.....	148
TABELA 3.24 – Variação do poder calorífico superior da madeira em função da espécie e do tamanho e forma da biomassa florestal (Teste de médias de Tukey).....	148

TABELA 3.26 - Teste F para o poder calorífico da madeira com casca de diferentes espécies e do tamanho e forma da biomassa florestal, em função do tempo de estocagem.....	148
TABELA 3.27 – Variação do poder calorífico superior da madeira com casca de diferentes espécies e do tamanho e forma da biomassa florestal, em função do tempo de estocagem (Teste de médias de Tukey). continua.....	148
TABELA 3.28 - Teste F para o poder calorífico líquido da madeira com casca em função da espécie e do tamanho e forma da biomassa florestal.....	149
TABELA 3.29 – Variação do poder calorífico líquido da madeira em função da espécie e do tamanho e forma da biomassa florestal (Teste de médias de Tukey).....	149
TABELA 3.31 - Teste F para o poder calorífico líquido da madeira com casca de diferentes espécies e do tamanho e forma da biomassa florestal, em função do tempo de estocagem.....	149
TABELA 3.32 – Variação do poder calorífico líquido da madeira com casca de diferentes espécies e do tamanho e forma da biomassa florestal, em função do tempo de estocagem (Teste de médias de Tukey).....	150
TABELA 3.33 - Teste F para o teor de cinzas em função da espécie e do tamanho e forma da biomassa florestal.....	150
TABELA 3.34 – Variação do teor De cinzas em função da espécie e do tamanho e forma da biomassa florestal (Teste de médias de Tukey).....	150
TABELA 3.36 - Teste F para o teor de cinzas de diferentes espécies e do tamanho e forma da biomassa florestal, em função do tempo de estocagem.....	151
TABELA 3.37 – Variação do teor de cinzas de diferentes espécies e do tamanho e forma da biomassa florestal, em função do tempo de estocagem (Teste de médias de Tukey).....	151

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

GRÁFICO 1.1 – Variação do teor de umidade na base úmida (%) da biomassa florestal (toras de Pinus e Eucalyptus e costaneiras de Pinus) durante o período de estocagem em cada lote avaliado .....	19
GRÁFICO 1.2 – Variação do teor de umidade na base úmida da biomassa florestal (toras de Pinus e Eucalyptus e costaneiras de Pinus) durante o período de estocagem.....	22
GRÁFICO 1.3 - Variação da solubilidade em água fria da biomassa florestal (toras de Pinus e Eucalyptus e costaneiras de Pinus) durante o período de estocagem em cada lote analisado.....	24
GRÁFICO 1.4 - Variação da solubilidade da biomassa florestal em água fria (toras de Pinus e Eucalyptus e costaneiras de Pinus) durante o período de estocagem.....	25
GRÁFICO 1.5 – Variação da solubilidade em água quente da biomassa florestal (toras de Pinus e Eucalyptus e costaneiras de Pinus) durante o período de estocagem em cada lote analisado.....	27
GRÁFICO 1.6 - Variação da solubilidade em água quente da biomassa florestal (toras de Pinus e Eucalyptus e costaneiras de Pinus) durante o período de estocagem.....	28
GRÁFICO 1.7 – Variação da solubilidade em hidróxido de sódio da biomassa florestal (toras de Pinus e Eucalyptus e costaneiras de Pinus) durante o período de estocagem em cada lote analisado.....	29
GRÁFICO 1.8 - Variação da solubilidade em hidróxido de sódio da biomassa florestal (toras de Pinus e Eucalyptus e costaneiras de Pinus) durante o período de estocagem.....	31
GRÁFICO 1.9 – Variação do poder calorífico superior (kcal/kg) da biomassa florestal (toras de Pinus e Eucalyptus e costaneiras de Pinus) durante o período de estocagem em cada lote analisado.....	33
GRÁFICO 1.10 - Variação do poder calorífico superior da biomassa florestal (toras de Pinus e Eucalyptus e costaneiras de Pinus) durante o período de estocagem em cada lote analisado.....	34
GRÁFICO 1.11 – Variação do poder calorífico líquido (kcal/kg) da biomassa florestal (toras de Pinus e Eucalyptus e costaneiras de Pinus) durante o período de estocagem em cada lote analisado.....	35
GRÁFICO 1.12 - Variação do poder calorífico líquido da biomassa florestal (toras de Pinus e Eucalyptus e costaneiras de Pinus) durante o período de estocagem.....	36
GRÁFICO 1.13 – Variação do teor de cinzas da biomassa florestal (toras de Pinus e Eucalyptus e costaneiras de Pinus) durante o período de estocagem em cada lote analisado.....	37
GRÁFICO 1.14 - Variação do teor de cinzas da biomassa florestal (toras de Pinus e Eucalyptus e costaneiras de Pinus) durante o período de estocagem.....	38
GRÁFICO 2.1 – Interação entre conteúdo de umidade de árvores recém cortadas e a data da colheita na Dinamarca (intervalo de confiança de 95%).....	47
GRÁFICO 2.2 – Relação entre a estação do ano e o tempo de secagem. Árvores inteiras de Picea abies (L.) Karst, estocadas de duas formas (o = em pilhas ou fardos, x = isoladas).....	50
GRÁFICO 2.3 – Teor de umidade na base úmida de toras com casca de Pinus e Eucalyptus e costaneira de Pinus em função da época de colheita.....	58
GRÁFICO 2.4 – Solubilidade em água fria de toras com casca de Pinus e Eucalyptus e costaneiras de Pinus, em função da época de colheita.....	59
GRÁFICO 2.5 - Solubilidade em água quente de toras com casca de Pinus e Eucalyptus e costaneiras de Pinus, em função da época de colheita.....	60
GRÁFICO 2.6 - Solubilidade em hidróxido de sódio de toras com casca de Pinus e Eucalyptus e costaneira de Pinus, em função da época de colheita.....	61
GRÁFICO 2.7 – Poder calorífico superior de toras com casca de Pinus e Eucalyptus e costaneira de Pinus em função da época de colheita.....	62
GRÁFICO 2.8 – Poder calorífico líquido de toras com casca de Pinus e Eucalyptus e costaneira de Pinus em função da época de colheita.....	64
GRÁFICO 2.9 – Teor de cinzas de toras com casca de Pinus e Eucalyptus e costaneira de Pinus em função da época de colheita.....	66
GRÁFICO 2.10 – Variação do teor de umidade na base úmida médio de cada lote em relação à época de estocagem da biomassa florestal.....	68
GRÁFICO 2.11 - Comportamento da solubilidade da madeira em água fria de cada lote em relação à época de estocagem do material.....	71

GRÁFICO 2.12 - Comportamento da solubilidade da madeira em água quente de cada lote em relação à época de estocagem do material.....	72
GRÁFICO 2.13 - Solubilidade em hidróxido de sódio de toras de Pinus e Eucalyptus e costaneira de Pinus em função da época de estocagem.....	73
GRÁFICO 2.14 – Comportamento dos valores médios do poder calorífico superior de cada lote em relação à época de estocagem do material.....	75
GRÁFICO 2.15 – Comportamento dos valores médios do poder calorífico líquido de cada lote em relação à época de estocagem do material.....	76
GRÁFICO 2.16 – Comportamento do teor de cinzas de cada lote em relação à época de estocagem do material .....	78
GRÁFICO 3.1 – Variação do teor de umidade na base úmida, em função da espécie e da forma e tamanho da biomassa florestal, em diferentes períodos de estocagem.....	98
GRÁFICO 3.2 - Variação da solubilidade da madeira com casca em água, em função da espécie e da forma e tamanho da biomassa florestal, em diferentes períodos de estocagem.....	101
GRÁFICO 3.3 - Variação da solubilidade da madeira com casca em água quente, em função da espécie e da forma e tamanho da biomassa florestal, em diferentes períodos de estocagem.....	103
GRÁFICO 3.4 - Variação da solubilidade da madeira com casca em hidróxido de sódio, em função da espécie e da forma e tamanho da biomassa florestal, em diferentes períodos de estocagem.....	105
GRÁFICO 3.5 – Variação do poder calorífico superior, em função da espécie e do tamanho e forma da biomassa florestal, em diferentes períodos de estocagem.....	107
GRÁFICO 3.6 - Variação do poder calorífico líquido, em função da espécie e da forma e tamanho da biomassa florestal, em diferentes períodos de estocagem.....	109
GRÁFICO 3.7 - Variação do teor de cinzas da madeira com casca, em função da espécie e da forma e tamanho da biomassa florestal, em diferentes períodos de estocagem.....	111
FIGURA 1 – Montagem das pilhas de biomassa florestal para o experimento (lote 1) – Pátio da empresa Battistella Indústria e Comércio Ltda., Lages –sc (18/10/2003).....	128
FIGURA 2 – Disposição da pilhas de biomassa florestal (Lote 1) – pátio da empresa Battistella Indústria e Comércio Ltda, Lages – SC (18/10/2003).....	128
FIGURA 3 – Aspecto da pilha de toras de Pinus taeda utilizada no experimento - pátio da empresa Battistella Indústria e Comércio Ltda, Lages – SC (18/10/2003).....	129
FIGURA 4 - Aspecto da pilha de toras de Eucalyptus dunnii utilizada no experimento - pátio da empresa Battistella Indústria e Comércio Ltda, Lages – SC (18/10/2003).....	129
FIGURA 5 - Aspecto da pilha de costaneiras de Pinus spp. utilizada no experimento - pátio da empresa Battistella Indústria e Comércio Ltda, Lages – SC (18/10/2003).....	130
FIGURA 6 – Aspecto geral da disposição das pilhas de três lotes– pátio da empresa Battistella Indústria e Comércio Ltda., Lages –SC (05/05/2004).....	130

## RESUMO

A estocagem é parte integrante do pré-tratamento da biomassa para o uso na geração de energia, tendo como objetivo melhorar as propriedades físicas e químicas da biomassa florestal. Pode ser utilizada ainda para regular o fornecimento do material para a planta industrial, alocar o material que não tem utilização ou mercado em determinada época ou região, e subsidiar unidades de geração de energia na adoção de procedimentos de manuseio e uso da biomassa. Estas práticas aumentam as vantagens competitivas da biomassa, minimizando suas desvantagens frente às outras fontes energéticas. Assim, a principal questão a ser respondida quando se tem como objeto de estudo a estocagem de biomassa florestal para a geração de energia é: Qual a possibilidade de se estabelecer procedimentos de estocagem, com base nas características físicas e químicas da biomassa florestal, de maneira a obter-se um melhor rendimento energético em menor tempo? Para responder a esta questão, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da estocagem sobre a qualidade da biomassa florestal destinada à geração de energia, através da determinação da influência: a) do tempo de estocagem sobre as propriedades da biomassa; b) da época de colheita e da época de estocagem nas propriedades da biomassa; c) da espécie, tamanho e forma da biomassa nas alterações ocorridas durante a estocagem. O experimento foi realizado no município de Lages, Estado de Santa Catarina, entre outubro de 2003 a fevereiro de 2005, utilizando-se toras com casca de *Pinus taeda* e *Eucalyptus dunnii* e costaneiras de *Pinus* spp., que ficaram estocadas por um período de 6 meses, com coletas no material recém produzido, com dois, quatro e seis meses de armazenamento. Foram analisados quatro lotes de madeira estocados segundo as estações do ano. As propriedades analisadas foram: teor de umidade na base úmida, poder calorífico superior e líquido, composição química (extrativos) e teor de cinzas. Concluiu-se que a época de colheita e estocagem, o tempo de estocagem, a espécie e o tamanho e forma da biomassa influenciaram nas propriedades físicas e químicas da biomassa sob armazenamento, em maior ou menor intensidade. O tempo ideal de estocagem variou de dois meses em épocas mais favoráveis do ano (primavera e verão) a quatro meses em épocas menos favoráveis (outono e inverno). As melhores épocas para a colheita da biomassa foram a primavera e verão, e as piores foram o inverno e outono, respectivamente. As melhores épocas de estocagem foram entre outubro e maio e entre agosto e fevereiro. Portanto, na região de estudo, para um maior rendimento energético, a biomassa deve ser colhida na saída do inverno ou primavera e permanecer sob estocagem durante o verão. O material que teve melhor comportamento durante a estocagem foi a costaneira de *Pinus*, sendo também o material mais heterogêneo. As toras de *Pinus* tiveram o pior comportamento. De forma geral, o tamanho e forma do material tiveram maior influência sobre o comportamento da biomassa na estocagem que a espécie.

Palavras-chave: biomassa florestal; estocagem; energia; *Pinus taeda*, *Eucalyptus dunnii*.



## USE OF WOOD STORAGE FOR ENERGY GENERATION

### ABSTRACT

Storage is an important part of the wood fuel pre-treatment as a means to generate energy when the objective is to improve the chemical and physical proprieties of the wood fuel. It can also be used to regulate the supply of material for the industrial plant, to allocate the material that is not used in the market in certain seasons or regions and to support units of energy generation when adopting procedures of wood fuel handling. This practices increase their competitive advantages diminish their advantages in relation to other energetic sources. Therefore, the main question to be answered, when the object of study concerning to the storage of wood fuel for energy generation, is: What is the possibility of establishing storage procedures based on the chemical and the physical characteristic of the wood fuel so as to obtain a better energetic yield, spending less storage time? The objective of the present work was to evaluate the effect of the storage over the quality of the wood fuel used to generate energy through the determination of the influence of the: a) the storage time over the wood fuel properties, b) the harvest time and the seasoning storage in the properties of the wood fuel submitted to storage; c) the specie, distribution size particle of wood fuel during the storage. The experiment was accomplished in Lages, in the State of Santa Catarina, Brazil, from October 2003 to February 2005, employing *Pinus taeda* and *Eucalyptus dunnii* logs with barks and *Pinus* spp. edges, stored in piles, during six months. The material used for the analysis was collected in the state of fresh material, with two, four and six months of storing. Four lots of stored wood, according to the season of the year, were analyzed. The evaluated properties were: moisture content; gross calorific value and net calorific value, wood chemical composition (extractives) and ash content. The results suggest that the harvest season, seasoning storage, storage time, specie and the size distribution particle influenced the wood fuel properties, with more or less intensity. The best storage time varied between two months in Summer and Spring (more favorable) and four months in Autumn and Winter (not so favorable). The best harvest time of the wood fuel was during Spring and Summer and the worst one was during Winter and Autumn. Concerning to the storage, the period from October to May and from August to February presented the best results. So, in the region were the study was accomplished, in order to get a better energetic yield, the wood fuel had to be harvested at the end of the Winter or in the Spring and be kept during Summer. The material that presented the best performance and heterogeneity, during the storage, was the *Pinus* edge. The worst results were obtained with the *Pinus* logs. Generally speaking, the size distribution particle influenced more, than did the specie, over the performance of the wood fuel during the storage.

Key words: wood fuel; storage; energy; *Pinus taeda*, *Eucalyptus dunnii*



## INTRODUÇÃO

O uso da biomassa florestal para a geração de energia teve grande contribuição histórica para o desenvolvimento da humanidade. A madeira foi a primeira fonte energética do homem, inicialmente empregada para aquecimento, caça e cocção de alimentos. Através dos tempos, passou a ser utilizada como combustível sólido, líquido e gasoso em processos para a geração de energia térmica, mecânica e elétrica. Hoje ainda, continua participando da matriz energética mundial, com maior ou menor intensidade em cada país. Seu uso é afetado por variáveis como o nível de desenvolvimento do país, preço, disponibilidade e questões ambientais relacionadas às fontes energéticas como petróleo, gás natural, hidroeletricidade, energia nuclear e outras, que competem com a biomassa florestal.

O aumento do interesse por parte de empresas, o apoio governamental e a expansão atual do uso de fontes energéticas renováveis é verificado principalmente pelas vantagens ambientais relacionadas a elas, em comparação com os recursos não-renováveis. Além disso, em comparação com as outras fontes renováveis, a biomassa florestal possui muitas características favoráveis, como a variabilidade na origem deste recurso, que pode ser oriundo do uso múltiplo das florestas ou de plantios destinados a este fim, de resíduos florestais, industriais e urbanos; maior geração de empregos no meio rural; balanço neutro entre emissão e geração de poluentes, o que possibilita seu uso no mercado de carbono; disponibilidade de tecnologia já desenvolvida para a conversão da biomassa em energia, com elevada eficiência, entre outras<sup>1</sup>.

No Brasil, o uso de resíduos da indústria de base florestal na geração de energia térmica, para atender as demandas do processo produtivo, é tradicional, com um número reduzido de empresas que possuem sistemas de co-geração de energia elétrica. Porém, a partir do final da década de 90, iniciativas para o uso da biomassa florestal em sistemas de co-geração vêm aumentando, inclusive com o ingresso no mercado de empresas que tem como objetivo principal a geração de energia a partir deste sistema, e não a manufatura de produtos da madeira.

---

<sup>1</sup> CONTO, SCHAITZA e HOEFLICH (1997), ANTUNES e ALMEIDA (2003), BONDUELLE, YAMAJI e BORGES (2004), CRUZ e NOGUEIRA (2004).

Esta é a realidade verificada na região onde foi desenvolvido o estudo constituinte desta tese. Na região de Lages, no Estado de Santa Catarina, no ano de 2001, foram iniciados os estudos para a instalação de uma planta de co-geração a partir de biomassa. Esta se constitui hoje no maior empreendimento desta natureza na América Latina, com capacidade para a geração de 28 MWh e 25 t/hora de vapor de processo. O vapor é produzido em uma caldeira, aquecida pela queima da biomassa, sendo utilizado tanto na turbina como na secagem da madeira de duas empresas de base florestal, parceiras do empreendimento.

No início da utilização mais intensa da madeira para a geração de energia, tanto por indústrias de base florestal como por geradoras de energia, tinha-se interesse pelo uso exclusivo de resíduos gerados nas indústrias, que eram utilizados nos sistemas de geração, na forma como eram produzidos.

Na região de estudo, a quantidade disponível mensalmente de resíduos, gerados nas indústrias, oscilou entre 10 a 30 mil toneladas/mês desde a implantação da co-geradora em 2001 até 2006. No entanto, devido ao desenvolvimento do mercado de resíduos, o aumento da quantidade utilizada e diversificação dos usuários, além das dificuldades de utilização pelo alto teor de umidade e variação de forma e tamanho, outras fontes precisaram ser buscadas. A primeira alternativa foi o consumo dos estoques de resíduos que estavam depositados a várias décadas nos pátios das indústrias, e que não tinham outra utilização senão a geração de energia. Porém, estes estoques, apesar de grandes<sup>2</sup>, são finitos e atualmente tem-se partido para outras fontes como madeira na forma de toras ou tórculos e resíduos florestais.

No entanto, somente a alteração da fonte não garante aumento de ganhos energéticos no processo. O baixo poder calorífico e massa específica, altos teores de umidade, custos de exploração e transporte elevados, necessidade de preparação e dificuldade de manuseio, devido à variação granulométrica<sup>3</sup>, são algumas das desvantagens da biomassa florestal. Estas variáveis precisam ser controladas para aumentar a eficiência de utilização e competitividade desta fonte. Portanto, o

---

<sup>2</sup> Alguns estoques de resíduos localizados na região de Lages foram estimados em 500 mil toneladas, o que seria suficiente para abastecer a planta de co-geração por pouco mais de um ano na sua plena carga de consumo.

<sup>3</sup> ANTUNES e ALMEIDA (2003).

desenvolvimento de estudos na área de qualificação da biomassa florestal para o uso energético tem sido um dos pontos importantes de pesquisa no Brasil e no mundo. Estes estudos sempre visam o aumento do ganho energético do material nos processos de conversão em energia.

Porém, alguns pontos relativos à qualificação energética ainda são pouco estudados e desenvolvidos, a exemplo da estocagem. A estocagem é parte integrante do pré-tratamento da biomassa para o uso industrial. Esta operação tem como objetivo melhorar algumas propriedades físicas e químicas da biomassa florestal para a geração de energia, regular o fornecimento do material para a planta industrial, ou simplesmente alocar o material que não tem utilização ou mercado em determinada época ou região.

No entanto, se a finalidade desta operação é a preparação da biomassa para a obtenção de ganhos no processo de conversão deste combustível em energia, alguns fatores devem ser levados em consideração e controlados, para que esta etapa do processo tenha sucesso. Estes estão relacionados ao tipo de material que será colocado sob estocagem, em termos de espécie, origem, componentes da biomassa, forma e tamanho do material; local onde a operação será realizada; tempo de duração da estocagem e época na qual esta será realizada, e quais propriedades da biomassa serão utilizadas para o controle do processo, de forma a promover o melhor controle da eficiência da estocagem.

O estudo da estocagem da biomassa florestal para fins energéticos vem sendo realizado a pouco mais de vinte anos em países europeus. Na Alemanha, Finlândia, Suécia, Dinamarca e Escandinávia, as pesquisas têm sido direcionadas para a estocagem de resíduos florestais como galhos e copas de árvores na floresta ou na indústria, como obtidos nos processos silviculturais, ou na forma de cavacos. Normalmente, os períodos ou tempo de estocagem excedem a uma estação do ano, devido às condições climáticas adversas nos meses de inverno. O controle da eficiência do processo é feito através do acompanhamento de variáveis como o teor de umidade,

perda de massa, poder calorífico, teor de cinzas, e controle dos níveis de biodegradação <sup>4</sup>. No Brasil, no entanto, as pesquisas são ainda escassas.

Neste contexto é que a estocagem e o pré-tratamento da biomassa florestal vêm surgindo, no país, como alternativa para controlar a qualidade desta fonte energética. Além disso, estes estudos técnicos podem ser utilizados para subsidiar as unidades de geração de energia na adoção de procedimentos de manuseio e uso da biomassa, aumentando assim suas vantagens competitivas e minimizando suas desvantagens frente às outras fontes.

Desta forma, a principal questão a ser respondida quando se tem como objeto de estudo a estocagem de biomassa florestal para a geração de energia é: Qual a possibilidade de se estabelecer procedimentos de estocagem, com base nas características físicas e químicas da biomassa florestal, de maneira a obter-se um melhor rendimento energético, com o menor tempo de estocagem?

As hipóteses levantadas, com base neste problema foram que: é possível estabelecer o tempo ideal de estocagem, de modo a serem atingidos valores nas propriedades físicas e químicas da biomassa florestal que promovam sua maior eficiência energética, em sistemas de co-geração. Além disso, é possível, através da análise das propriedades físicas e químicas da biomassa determinar o nível de influência da estocagem sobre sua qualidade energética em diferentes tempos de armazenamento, épocas de colheita e de estocagem e tamanho e forma do material submetido a este pré-tratamento.

Para responder a questão de pesquisa, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da estocagem sobre a qualidade da biomassa florestal destinada à geração de energia. Para tanto, foi determinada a influência:

- a) do tempo de estocagem sobre as propriedades da biomassa;
- b) da época de colheita e da época de estocagem nas propriedades da biomassa florestal submetida à estocagem;
- c) da espécie, tamanho e forma nas alterações ocorridas nas propriedades da biomassa durante a estocagem.

---

<sup>4</sup> HEDING (1984), THÖRNQVIST (1984a, 1984b, 1985, 1986, 1988), NURMI (1990, 1992, 1995, 1999); JIRJIS (1995, 2005), GARSTANG *et al* (2002).

Assim, este trabalho será apresentado em três capítulos. No primeiro capítulo é analisada a influência do tempo de estocagem sobre as propriedades da biomassa, buscando determinar o tempo ideal de estocagem, no qual as propriedades químicas e físicas da biomassa sejam maximizadas para a melhoria do desempenho do material, frente ao processo de combustão. No segundo capítulo é discutida a influência da época de colheita e da época de estocagem na qualidade da biomassa para geração de energia, considerando a influência destes fatores sobre as propriedades químicas e físicas importantes para o uso da biomassa na geração de energia. No terceiro capítulo é considerada a variação das propriedades da biomassa, em função da espécie, tamanho e forma do material, de modo a determinar qual destes fatores tem maior influência sobre a qualidade da biomassa para a geração de energia.

## CAPÍTULO 1 - INFLUÊNCIA DO TEMPO DE ESTOCAGEM SOBRE A QUALIDADE DA BIOMASSA FLORESTAL PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA

### RESUMO

Este trabalho teve o objetivo de determinar o tempo ideal de estocagem da biomassa florestal, para uso na geração de energia, através da análise da influência deste sobre as propriedades físicas e químicas da madeira com casca. O estudo foi realizado no Município de Lages, SC, entre outubro de 2003 e fevereiro de 2005. No experimento foram utilizadas toras com casca de *Pinus taeda* e *Eucalyptus dunnii* e costaneiras de *Pinus* spp., estocadas em pilhas. O material para análise foi coletado no estado recém colhido (testemunha), com dois, quatro e seis meses de estocagem. Foram utilizados quatro lotes, colhidos e estocados nas épocas de primavera, verão, outono e inverno. As propriedades avaliadas foram: teor de umidade na base úmida, poder calorífico superior e líquido, composição química e teor de cinzas. Os resultados demonstraram que o tempo de estocagem teve influência sobre o teor de umidade, teor de extrativos solúveis em água e poder calorífico líquido. Na estocagem de toras com casca e costaneira, por um período de seis meses, ocorreram somente alterações químicas na biomassa devido à disponibilização, transformação e perda dos extrativos. O tempo ideal de estocagem variou entre dois a quatro meses, sendo de dois meses em épocas mais favoráveis (primavera e verão) e de quatro em épocas menos favoráveis (outono e inverno).

Palavras-chaves: tempo de estocagem, biomassa florestal, energia de biomassa, *Pinus taeda*; *Eucalyptus dunnii*.

### ABSTRACT

**RELATION BETWEEN THE STORAGE TIME AND THE QUALITY OF WOOD FUEL.** The aim of this work was to establish the best storage time in the use of wood for energy generation, through the evaluation of the wood with bark considering chemical and physical properties. The experiment was accomplished in Lages, in the State of Santa Catarina, Brazil, from October 2003 to February 2005, employing *Pinus taeda* and *Eucalyptus dunnii* logs with barks and *Pinus* spp. edges, stored in piles, during six months. The material used for the analysis was collected in the state of fresh material, with two, four and six months of storing. Four lots of stored wood, according to the season of the year, were analyzed. The evaluated properties were: moisture content; gross calorific value and net calorific value, wood chemical composition (extractives) and ash content. The results indicated that the moisture content, water solubility of wood and net calorific value were influenced by the storage time of wood fuel. When the logs with bark and the edges were stored for six months occurred chemical changes in the extractives, through its availability, transformation



and lost. The best storage time varied between two months, in Summer and Spring (more favorable), and four months in Autumn and Winter (not so favorable).

Key words: storage time; wood fuel; energy; *Pinus taeda*; *Eucalyptus dunnii*.

## 1 INTRODUÇÃO

O tempo é um dos fatores mais importantes a ser considerado na estocagem<sup>5</sup>, pois influencia nas alterações das propriedades físicas e químicas da biomassa e nos custos operacionais da planta de geração de energia. Este item tem implicação direta sobre a imobilização do combustível e a ocupação de área para a realização da atividade.

Em países onde as condições climáticas são muito adversas, em determinadas épocas do ano, a colheita da biomassa é feita nas condições mais favoráveis de acesso ao recurso florestal. Nestes casos, a matéria-prima para a geração de energia é estocada por um ou mais períodos vegetativos. No entanto, o tempo muito longo de estocagem é prejudicial à qualidade da biomassa, pois, por tratar-se de material orgânico, os processos de degradação química, física e biológica promovem a perda de massa seca, que é o princípio que gera energia.

Portanto, o tempo de estocagem deve ser suficiente para diminuir o teor de umidade da biomassa, sem ocorrer perdas energéticas devido à perda de massa seca. A estocagem pode ainda ser influenciada por vários fatores, como o local onde a mesma é realizada, a época, alterações climáticas durante as estações do ano, o tipo e composição da biomassa e o grau final das propriedades desejado para a geração de energia.

De qualquer forma, deve-se procurar alcançar as condições de menor teor de umidade, menor perda de massa possível, maior ganho energético, no menor tempo, evitando assim, a elevação dos custos desta operação.

---

<sup>5</sup> THÖRNQVIST (1984a, 1984b, 1985, 1986, 1988); NURMI (1990, 1995); GARSTANG *et al* (2002); JIRJIS (1995, 2005).

Considerando-se estes fatores, o objetivo deste capítulo foi determinar o tempo ideal de estocagem, através da análise da influência deste sobre as propriedades físicas e químicas da biomassa florestal utilizada na geração de energia.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Os materiais orgânicos, como a madeira, sofrem mudanças durante a estocagem, sendo que a principal causa destas é a alteração do teor de umidade. Assim, um material absolutamente seco normalmente não se altera. Em contrapartida, com o aumento do teor de umidade, as perdas energéticas aumentam até certo ponto, e então decrescem (THÖRNQVIST, 1984b, p. 16).

Com relação ao teor de umidade THÖRNQVIST, em seus trabalhos de 1983, 1984b e 1985 constatou que, tanto para cavacos como para resíduos florestais, em maiores dimensões, de *Picea abies* e *Pinus silvestris*, na proporção de 30% e 70% na mistura, respectivamente, a secagem ocorre em maior proporção nos primeiros meses de estocagem. Porém, se o tempo de estocagem se estende, o conteúdo de umidade das pilhas aumenta. Isto acontece, além de outras coisas, pela quebra da estrutura ligno-celulósica e conseqüente aumento da água (THÖRNQVIST, 1984b, p. 16). Além disso, NURMI (1995, p. 249) salienta que na biomassa estocada, mesmo tendo havido secagem durante o verão, ocorre re-umidecimento se a estocagem se estender até o outono e inverno.

THÖRNQVIST<sup>6</sup>, citado por THÖRNQVIST (1985, p. 128), observou ainda que, em análise realizada durante um ano de estocagem, a secagem foi mais intensa nos primeiros dois a quatro meses. Entretanto, depois deste período, o conteúdo de umidade das pilhas aumenta. Após seis a nove meses, o teor de umidade torna-se igual ao teor de quando as pilhas foram construídas.

Além disso, o conteúdo de umidade afeta diretamente o poder calorífico, a perda de massa e a quantidade de esporos de fungos, durante a estocagem. Por sua vez, o poder calorífico líquido e a perda de massa influenciam diretamente o conteúdo de

---

<sup>6</sup> THÖRNQVIST, T. **Storing of disintegrated logging residuals (English summary)**. 1983. Report. Nº 137.

energia do combustível, enquanto que os fungos podem causar, além da perda de massa seca, também problemas de saúde nas pessoas que atuam na manipulação do material (THÖRNQVIST, 1984b, p. 16).

Com relação ao poder calorífico superior, no estudo realizado por THÖRNQVIST<sup>7</sup>, citado por THÖRNQVIST (1985, p. 130), os valores observados para biomassa florestal recém colhida variaram de 4872 a 4992 kcal/kg. No material que permaneceu na área de colheita por dois períodos vegetativos, o poder calorífico superior aumentou para 5087 kcal/kg, representando um aumento entre 1,9 a 4,4% em relação aos valores médios iniciais. O autor concluiu que o material estocado teve valor um pouco mais alto de poder calorífico superior que o cavaco recém gerado e não estocado.

THÖRNQVIST (1986, p. 07) analisando a estocagem de resíduos florestais e partículas de madeira de carvalho europeu, por um período de nove meses constatou que os valores de poder calorífico superior variaram de 4643 a 5025 kcal/kg no início de experimento e de 4650 a 5066 kcal/kg, no final. Os ganhos registrados foram de 0,08% a 1,81% no período de nove meses de estocagem.

GARSTANG *et al* (2002, p. 42) constatou que para madeira de gênero *Salix*, o poder calorífico superior se manteve constante nos primeiros 84 dias de estocagem. Depois deste período houve um aumento de 62,5%, em relação aos valores originais, decrescendo novamente e após estabilizando nos valores observados aos 84 dias de armazenamento.

NURMI (1990, p. 13) trabalhou com estocagem de cavacos de *Betula pubescens* que foram estocados em pilhas por um ano, na forma de árvore, antes do processo de transformação em partículas. O tempo de estocagem variou de seis meses a um ano e meio. Com relação ao poder calorífico superior, os valores observados antes da estocagem dos cavacos variaram de 4820 kcal/kg a 4884 kcal/kg. Após cinco meses e meio foram observados valores médios de 4844 kcal/kg, após 14 meses 4854 kcal/kg e após 18 meses valores médios de 4808 kcal/kg. As variações no poder calorífico superior foram respectivamente de 0,5%, 0,71% e -1,56%, caracterizando

---

<sup>7</sup> THÖRNQVIST, T. **The change of logging residues during storing at the clear cutting area in two growing seasons (English summary)**. 1984. Report n. 150.

que tempos muito longos de estocagem contribuem para a ocorrência de perdas energéticas.

NURMI (1995, p. 246), trabalhando também com *Salix*, constatou que o poder calorífico superior variou pouco, tanto na madeira recém colhida, quanto nas árvores estocadas em pilhas, por 18 meses. O autor observou valores para madeira, incluindo casca, de 4777 kcal/kg, no início do experimento e de 4750 kcal/kg no final do experimento, após 18 meses. Este decréscimo foi atribuído à diminuição do conteúdo médio de casca de 24,1 para 14,9%, no final do período de estocagem.

No trabalho desenvolvido por JIRJIS (2005, p. 199), que avaliou a influência do tamanho das partículas e da altura das pilhas na qualidade energética de ramos particulados de *Salix*, o autor concluiu que, quanto à variação do poder calorífico superior, esta foi pequena nos primeiros dois a três meses de armazenamento, independentemente do tamanho das partículas e da altura da pilha.

Assim, THÖRNQVIST<sup>8</sup>, citado por THÖRNQVIST (1985) e (1986), NURMI (1990, 1995) e JIRJIS (2005) concordam que o poder calorífico superior da biomassa florestal varia pouco em relação ao tempo de estocagem, discordando de GARSTANG *et al* (2002), que encontrou variações significativas entre os valores iniciais e finais na biomassa estocada.

Além disso, em se tratando de poder calorífico, devido à influência do teor de umidade sobre esta variável, quando o tema é o tempo de estocagem, o poder calorífico líquido passa a ser fundamental. Neste sentido, NURMI (1995, p. 246) observou valores de 3816 kcal no início do experimento e de 4270 kcal/kg, após 18 meses de estocagem do material. Esta variação foi creditada à redução do teor de umidade que partiu de 54% e findou com 26%. O autor observou ainda que o ganho no poder calorífico líquido, no segundo verão de estocagem, foi muito pequeno e não justificaria economicamente a manutenção do material por um tempo de estocagem de 18 meses, representando 11,90% de ganho no conteúdo energético.

Para o poder calorífico líquido NURMI (1990, p. 13) obteve valores de 4346 kcal/kg (31,1% de teor de umidade - TU) a 4390 kcal/kg (30,9% TU) na biomassa

---

<sup>8</sup> THÖRNQVIST, T. **The change of logging residues during storing at the clear cutting area in two growing seasons (English summary)**. 1984. Report n. 150.

antes da estocagem. Após cinco meses e meio foi obtido o valor médio de 4270 kcal/kg (31,4% TU), representando perda de 1,75%; após 14 meses o valor médio de 4318 kcal/kg (27,8% TU), ou perda de 0,64%; e aos dezoito meses, 4168 kcal/kg (39%), ou perda de 4,1%. As maiores diferenças nesta variável foram encontradas na biomassa que permaneceu por longo tempo em estocagem, indicando que longos períodos de estocagem são negativos. Porém os valores apresentados por NURMI (1990) são muito elevados, quando comparados com os encontrados por BRITO e BARRICHELO (1982); BRITO (1986), NOGUEIRA e LORA (2003); TEIXEIRA e LORA (2004) e LEHTOVAARA (2004).

Considerando a composição química da biomassa sob estocagem, no armazenamento aeróbio, processo que ocorre em uma pilha de madeira, ocorre inicialmente alterações nos extrativos da madeira (GARSTANG *et al*, 2002, p. 57). Os extrativos são constituídos por uma grande variabilidade de componentes químicos, que representam uma pequena porcentagem da massa seca da madeira, denominados assim por serem extraídos a partir de solventes orgânicos neutros e água. Estes compostos são formados por inúmeros componentes individuais (BROWNING, 1963, p. 313, FENGEL e WEGENER, 1989, SJÖSTRÖM, 1993, p. 90, p. 182), de natureza hidrofílica ou lipofílica (SJÖSTRÖM, 1993, p. 90).

Basicamente, os extrativos podem ser classificados, segundo sua composição química, em terpenos e terpenóides, graxas e gorduras (compostos alifáticos) e compostos fenólicos, além dos compostos inorgânicos que constituem as cinzas da madeira (SJÖSTRÖM, 1993, p. 92-107 e KLOCK, MUÑIZ e HERNANDEZ, 2006, p. 73). Por sua vez, estes compostos químicos se subdividem em inúmeros outros que estão presentes em quantidade e composição diferenciadas na madeira de Gimnospermas e Angiospermas.

Com relação à estocagem, segundo SJÖSTRÖM (1993, p. 107), depois da colheita das árvores, os extrativos lipofílicos (ácidos graxos; glicerídeos, ácidos resinosos, esteróis e esteril-ésteres) sofrem alteração em sua composição e começam a decrescer.

Tanto os processos auto-oxidativos como os enzimáticos ocorrem durante a estocagem da madeira. O oxigênio ataca as duplas ligações dos extrativos e inicia uma

cadeia de reações que geram radicais livres. Os radicais hidroxílicos são particularmente fortes oxidantes. Na presença de íons de metal de transição, durante a reação, são formados hidroperóxidos que também são decompostos em radicais hidroxílicos. Além disso, as reações de auto-oxidação são aceleradas pela luz (SJÖSTRÖM, 1993, p 107).

Durante a estocagem de toras de *Picea* em água do mar, por quatro meses, durante o verão, no sul da Finlândia, EKMAM (não publicado), citado por SJÖSTRÖM (1993, p. 108) observou que a quantidade de glícideos diminui para menos da metade dos valores originais, enquanto que os ácidos graxos aumentaram consideravelmente, aumentando também os ácidos resinosos. Neste estudo, o autor observou também que os esteróis e esteril-esteres se mantiveram praticamente constantes.

SJÖSTRÖM (1993, p. 108) observou que os ácidos resinosos com sistemas de duplas ligações conjugadas do tipo abietano<sup>9</sup> são oxidados rapidamente. Os ácidos graxos insaturados, tanto livres como insaturados, são também oxidados. A reação do ácido linolênico procede mais rapidamente que o ácido linoléico, que por sua vez é oxidado mais rapidamente que o ácido oléico (SJÖSTRÖM, 1993, p. 108).

Os ácidos graxos dienóicos e trienóicos são oxidados por certas enzimas, como as liposidases. Como resultado disso, a hidrofília e a solubilidade em água são aumentadas. Além da oxidação, certas enzimas agem como catalisadoras na hidrólise das graxas (SJÖSTRÖM, 1993, p. 108).

A auto-oxidação e as reações enzimáticas são largamente influenciadas pelas condições prevalentes durante a estocagem da madeira. Estas reações são muito mais rápidas na madeira estocada na forma de partículas que na estocada na forma de toras. Também é conhecido que a hidrólise dos trissacarídeos, que leva a formação de ácidos graxos livres, ocorre mais rapidamente na condição de estocagem de madeira úmida em relação à estocagem da madeira seca. (SJÖSTRÖM, 1993, p. 108).

---

<sup>9</sup> Os mais comuns ácidos resinosos na Gimnospermas são os terpenóides tricíclicos, que são classificados em tipos pimaranos e abietanos. Os principais ácidos abietanos são: ácido abiético; ácido levopimarico; ácido palústrico; ácido neoabiético e ácido dehidroabiético. Este tem um grupo isopropil ou isopropenil na posição C-13 ((SJÖSTRÖM, 1993, p. 99).

GARSTANG *et al*, 2002 (p. 16) lembra ainda que as alterações iniciais, ocorridas durante a estocagem são também devidas à fermentação dos açúcares da madeira, produzindo ácidos graxos voláteis, álcool e água, com a liberação de CO<sub>2</sub> e calor. Na ausência de atividades específicas de preservação, a oxidação destes ácidos orgânicos ocorre em vários níveis nas pilhas de madeira.

A decomposição da madeira implica em uma mudança na relação entre as proporções dos conteúdos de celulose e lignina. Se o conteúdo de lignina aumenta no material estocado, que é provável de ocorrer devido à decomposição por fungos de podridão parda, há também um aumento no poder calorífico superior. Com a decomposição de materiais orgânicos, a porcentagem dos materiais inorgânicos (cinzas) aumenta (THÖRNQVIST<sup>10</sup>, citado por THÖRNQVIST, 1985, p. 130).

Porém, se os extrativos forem estabilizados pela fermentação para produzir um pH baixo e estável, então a estocagem terá maior período de estabilidade. Se, subsequente, a estocagem é manejada para permitir uma oxidação controlada dos ácidos graxos, então, com o aquecimento endógeno e solar e a evaporação pelo vento, aliado a mínima retenção de chuva, o material estocado tenderá a ter mínima perda energética, com perda de umidade passiva, durante a estocagem. Os carboidratos solúveis terão uma preservação inicial e energia para o subsequente processo de secagem (GARSTANG *et al*, 2002, p. 16).

JOHNSON *et al*, citados por JIRJIS (1995, p. 186) também trabalharam neste campo e chegaram à conclusão que após 26 a 52 semanas (6,5 a 13 meses) de armazenamento, de diferentes madeiras e herbáceas, apenas pequenas mudanças (<3%) foram observadas nos componentes químicos da madeira (celulose, lignina e polioses). As maiores mudanças foram observadas nos extrativos obtidos por extração em etanol a 95%. O decréscimo do conteúdo de extrativos observado pelos autores foi superior a 70% em relação ao originalmente encontrado.

GARSTANG *et al* (2002, p. 57), trabalhando com madeira de *Salix* e resíduos florestais, na forma de partículas, constatou que o conteúdo de carboidratos solúveis em água no início do experimento de armazenamento apresentou valores entre 0,5 a

---

<sup>10</sup> THÖRNQVIST, T. **Drying of fuel chips with solar panel warmed air (English summary)**. Department of Forest Products, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala. 1982. Report n. 126.

1,0%, com valores irregulares, e muita variação nos primeiros 50 dias de estocagem, declinando após este período para valores uniformes abaixo de 0,5%. O autor constatou ainda que a liberação dos carboidratos solúveis em água é uniforme nas diferentes profundidades das pilhas.

THÖRNQVIST (1986, p. 08) não observou alterações na quantidade de lignina ou carboidratos durante o período de estocagem na madeira contida na biomassa florestal estocada durante um período de nove meses. No entanto, durante longos períodos de estocagem, os polissacarídeos da madeira podem ser atacados por microorganismos SJÖSTRÖM (1993, p. 107), conduzindo à formação de extrativos (JOHNSON *et al*, citados por JIRJIS (1995, p. 186) e (GARSTANG *et al*, 2002, p. 16).

GARSTANG *et al* (2002, p. 19) menciona que qualquer redução significativa na atividade biológica da biomassa sob estocagem, através da respiração ou fermentação resultará no aumento da porcentagem de cinzas, sendo este irreversível.

Em estudos realizados por THÖRNQVIST<sup>11</sup> e NYLINDER e THÖRNQVIST<sup>12</sup>, citados por THÖRNQVIST (1985, p. 130), o teor de cinzas em resíduos florestais reduzidos em partículas, durante a estocagem, apresentou valores médios de 1,3 a 13,1%. GARSTANG *et al* (2002, p. 78), constatou que o teor de cinzas de biomassa proveniente de árvores do gênero *Salix*, proveniente de rotações curtas, apresentou valores entre 1 e 2 %, flutuando drasticamente durante o período de estocagem, provavelmente devido ao acaso na coleta das amostras.

No trabalho desenvolvido por JIRJIS (2005, p. 199), o autor concluiu que os teores de cinza de ramos particulados de *Salix* não tiveram variação significativa durante a estocagem. O valor do material recém produzido foi de 1,87 % e após dois e três meses de estocagem foram obtidos valores de 1,98 a 2,0 % para pilhas de 3 m e 1,89 a 2,17 % para pilhas de 6 m.

THÖRNQVIST (1986, p. 07) observou que o teor de cinzas nas partículas de carvalho variou entre 0,9 a 1,5 % antes da estocagem e entre 1,4 a 1,6 % após nove

---

<sup>11</sup> THÖRNQVIST, T. **Drying of fuel chips with solar panel warmed air (English summary)**. Department of Forest Products, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala. 1982. Report n. 126.

<sup>12</sup> NYLINDER, M.; THÖRNQVIST, T. **Storing of branches and tops of different fractions (English summary)**. 1981. Report n° 113.



meses de estocagem. Nos resíduos de colheita particulados os valores médios variaram entre 1,8 a 2,4 % antes da estocagem e de 2,8 a 3,3 % após a estocagem.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado na cidade de Lages, Estado de Santa Catarina, entre outubro de 2003 a fevereiro de 2005. Os dados meteorológicos do período de estudo estão apresentados na TABELA 1.1.

TABELA 1.1 – CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DA REGIÃO DE LAGES – SC (OUTUBRO DE 2003 A FEVEREIRO DE 2005)

DADOS	ANO																
	2003			2004												2005	
	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev
Precipitação (mm)	119	94	225	81	114	144	82	103	28	233	52	278	162	104	136	147	47
Temperatura (°C)	18	19	20	21	21	20	19	13	13	12	14	17	17	19	20	22	22
Umidade relativa (%)	76	72	79	78	76	77	83	85	82	84	77	82	75	76	76	76	75

FONTE: EPAGRI

NOTA: A precipitação total do ano de 2004 foi de 1517 mm, e os valores médios de temperatura e umidade relativa foram 17°C e 79%, respectivamente.

Os dados meteorológicos foram levantados para o conhecimento das condições climáticas no período de realização do estudo. Isto é importante, pois os resultados obtidos em estudos de estocagem devem ser apresentados mencionando-se às condições climáticas observadas durante o período de análise, possibilitando assim estudos comparativos com outras regiões.

Os dados apresentados refletem as condições climáticas de anos típicos na região, porém não foram utilizados em cruzamentos com os dados obtidos nas análises realizadas, por não se constituir em objeto do estudo.

A avaliação da influência do tempo de estocagem sobre a qualidade da biomassa florestal foi realizada em toras com casca das espécies de *Pinus taeda* e *Eucalyptus dunnii*, com diâmetros variados<sup>13</sup> e comprimento médio de 2,4 m. Além das toras foram utilizadas costaneiras<sup>14</sup>, contendo ou não casca, da espécie *Pinus taeda*, com comprimento médio de 2 m.

<sup>13</sup> Os diâmetros das toras utilizadas no estudo variaram de 8 a mais de 30 cm, pois o material de estudo foi constituído de madeira destinada à geração de energia (toras finas) e toras descartadas em processos industriais (toras grossas), sendo que esta variável não foi controlada no estudo.

<sup>14</sup> Costaneira é a nomenclatura dada às peças em forma de meia lua, obtidas na transformação de toras em blocos ou semi-blocos, através de serras de desdobro primário.

Foram analisados quatro lotes de cada tipo de material sob estocagem, sendo que cada lote permaneceu sob armazenamento durante seis meses. As amostragens para análise da biomassa foram feitas no material recém colhido, com dois, quatro e seis meses de permanência no campo experimental. O delineamento utilizado pode ser visualizado na TABELA 1.2.

Cada um dos três materiais avaliados foi estocado separadamente, em pilhas com dimensões médias de 6 m de comprimento, 2,5 m de largura e 2,5 m de altura, e volume aproximado de 10 m cúbicos. Entre uma pilha e outra foi deixado um espaço de 3,5 m para facilitar a coleta e propiciar aeração.

As pilhas foram construídas de forma que o comprimento das toras ficasse no sentido leste-oeste, para que houvesse máxima radiação solar sobre a superfície das mesmas, conforme orientação de HILLEBRAND *et al.* (1999). Este autor afirma que a construção das pilhas de estocagem tem efeito significativo sobre a homogeneidade da secagem de resíduos de colheita. Os detalhes da montagem das pilhas e posicionamento destas no pátio são apresentados nas Fotos do APÊNDICE I.

TABELA 1.2 – DELINEAMENTO EXPERIMENTAL PARA ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO TEMPO DE ESTOCAGEM SOBRE A QUALIDADE DA BIOMASSA FLORESTAL

LOTE	ÉPOCA DE ESTOCAGEM	MESES DE COLETA	NÚMERO DE DIAS DE ESTOCAGEM <sup>15</sup>
1	Outubro/2003 a maio/2004	Outubro Novembro Março Maio	Recém-coletado 31 dias (20 dias - costaneira) 139 dias (128 dias – costaneira) 200 dias (180 dias – costaneira)
2	Janeiro/2004 a agosto/2004	Janeiro Abril Junho Agosto	Recém-coletado 69 dias 127 dias 190 dias
3	Maio/2004 a novembro/2004	Maio Junho Setembro Novembro	Recém-coletado 49 dias 124 dias 180 dias
4	Agosto/2004 a Fevereiro/2005	Agosto Outubro Novembro Fevereiro	Recém-coletado 56 dias 105 dias 183 dias

FONTE: O autor.

As amostras foram coletadas na base, meio e topo das pilhas. Sem haver remoção da casca, as toras e costaneiras foram transformadas em cavacos, nos quais foram realizadas as determinações das propriedades físicas e químicas<sup>16</sup>.

Neste trabalho, o teor de umidade na base úmida<sup>17</sup> foi determinado nos cavacos úmidos. Para as análises químicas, os cavacos foram secados e transformados em serragem, de acordo com as Normas TAPPI 257 (*Sampling and preparing wood for analysis*) e TAPPI 264 (*Preparation of wood for chemical analysis - Including procedures of removal of extractive and determination of moisture content*). Após esta

<sup>15</sup> A variação observada no tempo de coleta, em dias, foi devida a condições climáticas adversas, falta de pessoal; indisponibilidade de máquinas para a confecção das pilhas, coleta ou transporte do material, ou outros fatores de força maior.

<sup>16</sup> As definições das propriedades utilizadas para avaliar a qualidade da biomassa frente a estocagem estão no Glossário, APÊNDICE ao trabalho.

<sup>17</sup> No caso do uso da madeira para a geração de energia, a informação relativa à umidade deve-se referir ao peso total, até mesmo porque, esta é a base mais utilizada nos cálculos do poder calorífico líquido. Além disso, esta é a base de referência normalmente encontrada na literatura, facilitando as comparações e discussões do trabalho.

preparação foram determinados o poder calorífico superior e líquido, solubilidade em água fria, quente e hidróxido de sódio, e teor de cinzas.

O teor de umidade na base úmida foi determinado através da diferença de pesagem entre o material úmido, como recebido para análise, e após secagem em estufa a  $103 \pm 2^\circ\text{C}$ , até peso constante, através da Equação (2.1), apresentada por NOGUEIRA e LORA (2003).

$$H_s = (P_t - P_s)/P_t \quad \text{Equação 2.1}$$

Onde:

$H_s$  = Teor de umidade na base úmida (%) (kg água/kg material nas condições de trabalho).

$P_t$  = massa da amostra úmida (g), na condição de queima;

$P_s$  = massa da amostra seca (g), estado da biomassa seca em estufa a  $105^\circ\text{C}$ , até peso constante.

O poder calorífico superior e poder calorífico inferior na base úmida (poder calorífico líquido) foram determinados em bomba calorimétrica Marca IKA, Modelo 2000, utilizando-se a Norma DIN 51900 (*Determining the gross calorific value of solid and liquid fuels using the bomb calorimeter, and calculation of net calorific value*). O poder calorífico líquido foi obtido na bomba calorimétrica através do fornecimento dos dados de teor de umidade na base úmida, teor de cinzas e porcentagem de hidrogênio da amostra, que foi padronizado em 6 %.

A determinação da solubilidade da madeira em água fria e quente obedeceu a norma TAPPI T 207 (*Water solubility of wood and pulp*) e solubilidade em hidróxido de sódio a Norma TAPPI 212 (*One percent sodium hydroxide solubility of wood and pulp*). A avaliação da composição química quantitativa da madeira foi incluída neste trabalho, pois, a quantidade de extrativos obtida nas diferentes épocas e períodos de estocagem pode indicar as alterações químicas ocorridas na biomassa em função da estocagem, que contribuem para a alteração na massa seca do material.

O teor de cinzas foi obtido, na base seca, conforme Norma TAPPI 211 (*Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at  $525^\circ\text{C}$* ).

Como o objeto de estudo foi o tempo de estocagem, os resultados obtidos para os três materiais testados (toras com casca de *Pinus taeda*, toras com casca de *Eucalyptus dunnii* e costaneiras de *Pinus* spp.) foram analisados conjuntamente, para cada tempo de estocagem. Portanto, sem a distinção de espécie, que será avaliada no Capítulo 3. Desta forma, os resultados obtidos representam a amplitude do que pode ser observado em relação as diferentes espécies fornecedoras de biomassa para a geração de energia, na região de estudo.

O tratamento estatístico dos dados foi feito através da ANOVA/MANOVA, utilizando-se o teste F para verificação de variação significativa ao nível de 95 %, e confirmação da variação através do Teste de média de Tukey.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

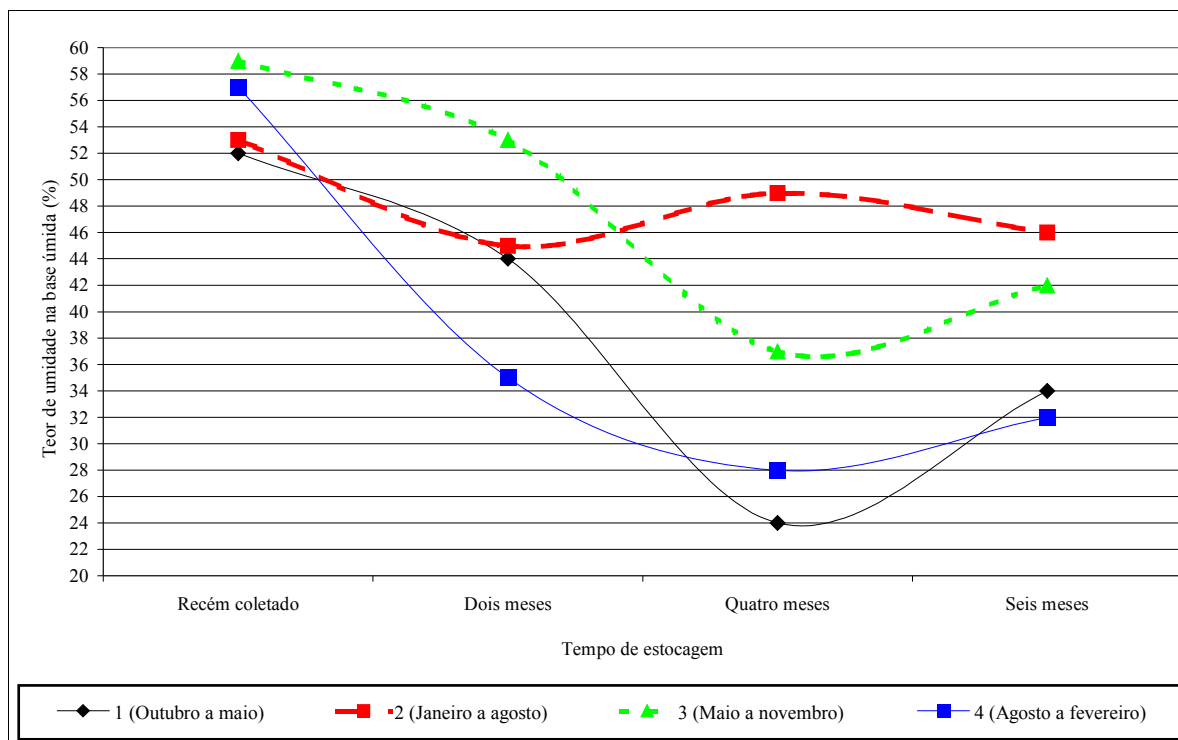
### 4.1 Teor de umidade

O tempo de estocagem teve influência sobre o teor de umidade, sendo que a variação desta propriedade foi significativa em relação ao período de estocagem (TABELAS 1.3 e 1.4 – APÊNDICE II).

O teor de umidade foi alto no material recém-coletado, diminuindo nos primeiros quatro meses de estocagem, voltando a aumentar após este período. Esta tendência de comportamento foi semelhante ao observado por THÖRNQVIST (1983, 1984b e 1985). Porém, neste estudo os teores de umidade, ao final de seis meses, não se igualaram aos valores iniciais, como observado pelo autor.

Os quatro lotes analisados tiveram comportamento similar no início do período de estocagem, ou seja, tiveram perda de umidade nos dois primeiros meses. Os lotes estocados entre outubro a maio (lote 1), entre maio a novembro e (lote 3) e entre agosto e fevereiro (lote 4) continuaram perdendo umidade até o quarto mês, enquanto que o material estocado entre janeiro a agosto (lote 2) começou a ganhar umidade já após o segundo mês de estocagem (GRÁFICO 1.1).

GRÁFICO 1.1 – VARIAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE NA BASE ÚMIDA (%) DA BIOMASSA FLORESTAL (TORAS DE *Pinus* E *Eucalyptus* E COSTANEIRAS DE *Pinus*) DURANTE O ERÍODO DE ESTOCAGEM EM CADA LOTE AVALIADO



FONTE: O autor

O tempo de estocagem foi influenciado pela época de estocagem. A biomassa coletada no verão (janeiro – lote 2), e estocada predominantemente durante o inverno, perdeu umidade somente nos dois primeiros meses (até março), aumentando o teor de umidade já com quatro meses de estocagem (junho), e mantendo-se alto até o final do período analisado (agosto). Este comportamento foi similar ao observado por NURMI (1995). Já a biomassa coletada no verão (lote 1 - outubro), como também a biomassa coletada na saída do inverno (lote 4 – agosto) e estocada predominantemente nos meses de verão perdeu umidade até quatro meses de estocagem, aumentando o teor de umidade somente após este período.

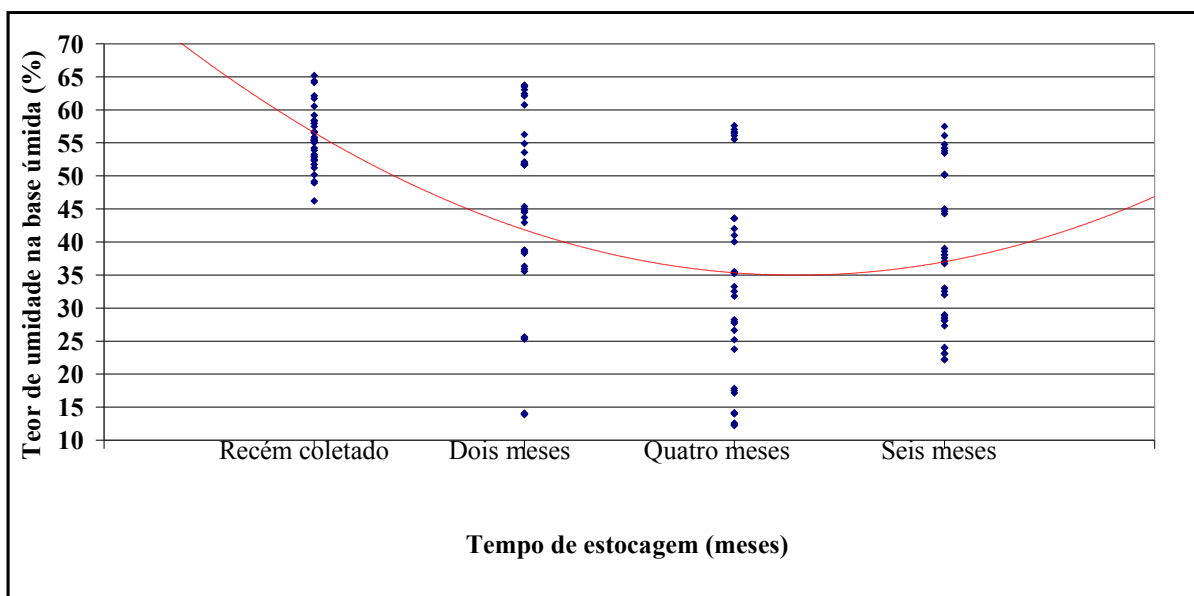
Este comportamento pode estar relacionado às condições climáticas, que são diferentes entre os meses de verão e inverno, principalmente com relação à umidade relativa, que é mais alta no inverno em relação ao verão, como também das

temperaturas mais baixas no inverno, o que dificulta a evaporação da água contida na biomassa. Além disso, a quantidade de água na biomassa influencia a velocidade de perda de umidade. A biomassa do lote 3, mesmo tendo sido coletada em maio, teve perda de umidade no inverno, por se constituir no primeiro período de estocagem, onde o teor de umidade inicial era maior, e continuou perdendo água até quatro meses de estocagem, devido a entrada da primavera. No entanto, para este lote, a velocidade de perda de umidade foi menor.

Os valores de teor de umidade variaram desde 12 %, em material com quatro meses de estocagem, até 65% em material recém-coletado. O material recém-coletado foi diferente de todos os demais, tendo a maior média de teor de umidade (56 %). O material com dois (44 %) e quatro meses (33 %) foram iguais a seis meses (38 %), mas diferentes entre si, e o tempo de seis meses foi somente diferente do estado recém-coletado (TABELA 1.4 - – APÊNDICE II). A menor dispersão entre os valores obtidos foi no material recém-coletado, e a maior foi no material com dois meses de estocagem (GRÁFICO 1.2).

A construção do GRÁFICO 1.2 foi realizada sem levar em consideração as diferentes épocas de estocagem, espécies, forma e tamanho da biomassa. Portanto, este gráfico somente expressa o comportamento da biomassa frente ao tempo de estocagem. Porém, é importante ressaltar que está não é a única variável que tem influência sobre o material, pois outros fatores, anteriormente mencionados têm influência sobre o tempo necessário para que a biomassa alcançasse o teor de umidade ideal para a geração de energia.

GRÁFICO 1.2 – VARIAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE NA BASE ÚMIDA DA BIOMASSA FLORESTAL (TORAS DE *Pinus* E *Eucalyptus* E COSTANEIRAS DE *Pinus*) DURANTE O PERÍODO DE ESTOCAGEM



FONTE: O autor

Considerando que o teor de umidade mínimo necessário para que a biomassa tenha bom desempenho nos sistemas de geração é de 30 % ou menos (BRITO e BARRICHELO (1982) e GARSTANG *et al*, (2002)), os lotes 4 e 1 tiveram o melhor comportamento. O tempo de estocagem ideal para toras com casca e costaneira foi entre dois a quatro meses, dependendo da época do ano na qual esta operação foi realizada.

#### 4.2 Composição química da madeira com casca

Houve variação significativa da solubilidade da madeira em água fria, em função do tempo de estocagem (TABELAS 1.5 e 1.6 – APÊNDICE II ).

Para os quatro lotes avaliados, nos primeiros dois meses de estocagem ocorreram reações de transformação e disponibilização dos extrativos (oxidação, fermentação, reações enzimáticas), observadas também por SJÖSTRÖM (1993, p. 107) e GARSTANG *et al* (2002, p. 57). Porém, o aumento na quantidade de



solubilizados indica que este período de estocagem não foi suficiente para que ocorresse a perda dos compostos da madeira. Por isso, com dois meses, a porcentagem de solubilizados aumenta em relação aos valores iniciais. Após quatro meses, estes componentes além de serem transformados e disponibilizados são também perdidos, por volatilização ou outros processos físicos, contribuindo para a diminuição dos valores, em relação aos observados anteriormente.

Os lotes 3, 1 e 4 tiveram as maiores variações percentuais na solubilidade dos extrativos ao longo do tempo de estocagem, com relação aos valores iniciais (GRÁFICO 1.3). O aumento da solubilidade foi da ordem de 54,75 %, 50,18% e 43,14 %, respectivamente para estes lotes, nos primeiros dois meses de estocagem. Após este período as variações diminuíram com relação aos valores iniciais, havendo perda na solubilidade. Após seis meses de estocagem, as perdas de extrativos foram da ordem de 43,86 %, 25,83 %, 41,83 % e 6,37 %, respectivamente para os lotes 1, 2, 3 e 4. Estes valores foram inferiores aos 70 % mencionados por JOHNSON *et al*, citados por JIRJIS (1995), que avaliaram as diferenças na composição da quatro espécies madeiráveis e seis espécies herbáceas, durante períodos de estocagem que variaram de 26 a 52 semanas.

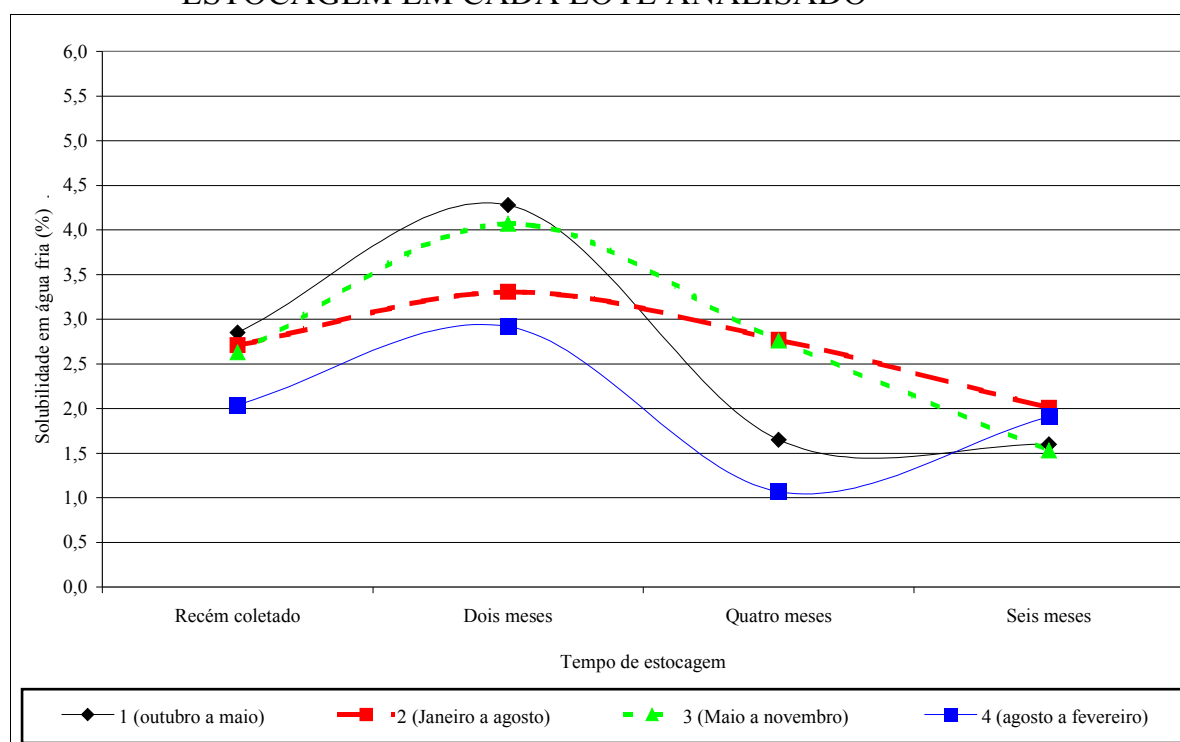
As análises demonstraram que o tempo de estocagem contribuiu para a variação da quantidade de extrativos solúveis em água fria, através da transformação e disponibilização, nos primeiros meses de estocagem, com posterior perda dos mesmos em períodos superiores a quatro meses de armazenamento (GRÁFICO 1.3).

Além disso, como foi realizada análise da madeira com casca, o tempo de estocagem pode ter contribuído para a diminuição da proporção de casca em relação à madeira, como observado por NURMI (1995, p. 246), quando este avaliou a variação do poder calorífico em biomassa estocada. A diminuição da proporção de casca afeta a quantidade de extrativos, uma vez que aquela tem maior proporção de extrativos em relação a esta, de forma a diminuir a quantidade de solubilizados no material com maior tempo de estocagem.

Segundo FENGEL e WEGENER (1989, p. 244), a composição química da casca difere da madeira pela presença de polifenóis e suberina, pela baixa porcentagem

de polissacarídeos e alta porcentagem de extrativos. Os extrativos podem variar de 18,3 a 27,5% na casca de *Pinus taeda*, em função do tipo de solventes utilizados.

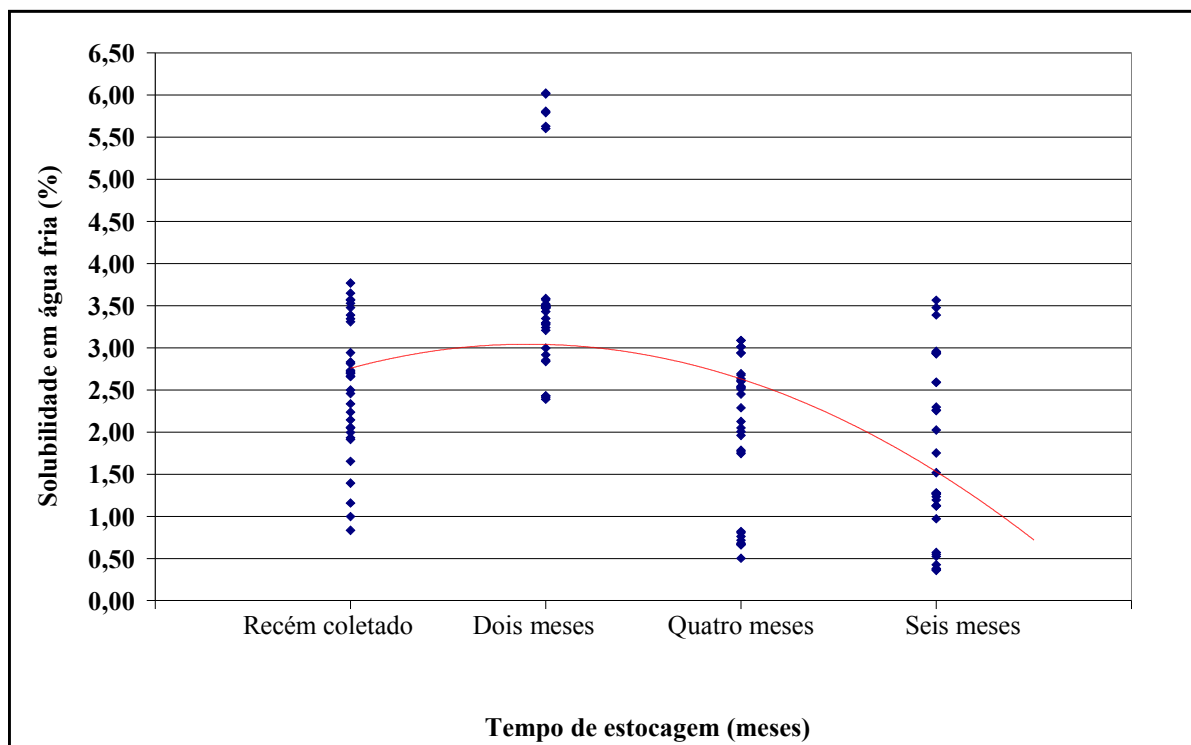
GRÁFICO 1.3 - VARIAÇÃO DA SOLUBILIDADE EM ÁGUA FRIA DA BIOMASSA FLORESTAL (TORAS DE *Pinus* E *Eucalyptus* E COSTANEIRAS DE *Pinus*) DURANTE O PERÍODO DE ESTOCAGEM EM CADA LOTE ANALISADO



FONTE: O autor

Os valores extremos variaram desde 0,36%, em material estocado durante seis meses, até 6,03 % em material com dois meses de estocagem. A biomassa recém coletada (2,55 %) foi somente igual estatisticamente ao material estocado por quatro meses (2,00 %). Este último período foi igual também ao material com seis meses de estocagem (1,74 %). A biomassa com dois meses de estocagem foi diferente de todos os demais períodos, tendo a maior média de solubilidade (3,68 %) (TABELA 1.6 e GRÁFICO 1.4).

GRÁFICO 1.4 - VARIAÇÃO DA SOLUBILIDADE DA BIOMASSA FLORESTAL EM ÁGUA FRIA (TORAS DE *Pinus* E *Eucalyptus* E COSTANEIRAS DE *Pinus*) DURANTE O PERÍODO DE ESTOCAGEM



FONTE: O autor

A maior variação nos dados ocorreu aos dois meses de estocagem, sendo que os valores variaram de 2,39 % a 6,03 %. Porém, mesmo eliminando-se os valores próximos de 6,00 %, que estão bem acima dos valores médios obtidos, ainda assim, o comportamento continua sendo o mesmo, não sendo significativa a alteração.

Como para a água fria, a solubilidade da madeira em água quente também é influenciada pelo tempo de estocagem (TABELAS 1.7 e 1.8 – APÊNDICE II ). Os valores extremos obtidos variaram desde 0,64%, em material com seis meses de estocagem, até 7,46% em material com dois meses de estocagem. O tempo de estocagem de dois meses (4,22 %) foi diferente da biomassa recém colhida (3,24 %), com quatro meses (3,11 %) e com seis meses (2,96 %) de estocagem.

Os processos de transformação e disponibilização (processos químicos), no início do período de estocagem, seguido da perda por processos físicos ocorrido na solubilidade em água fria se repetiu para a água quente. Neste aspecto, GARSTANG

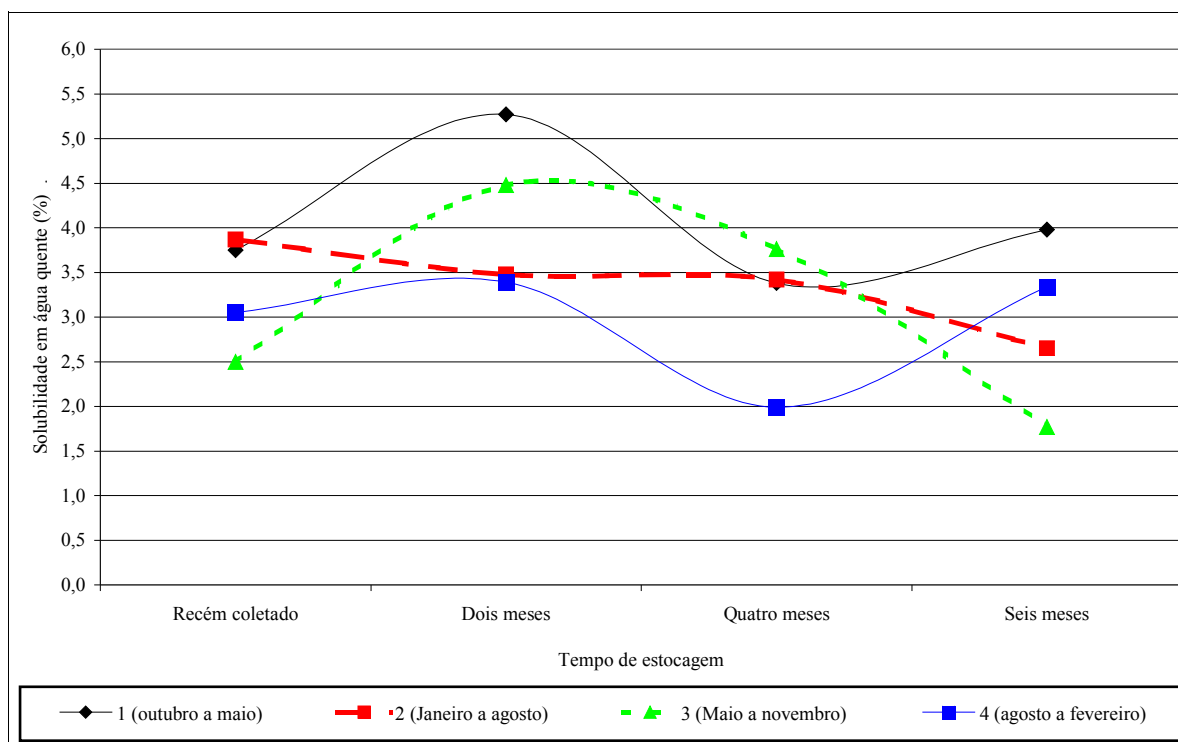
*et al* (2002) também observou valores irregulares na solubilidade dos extrativos solúveis em água nos primeiros 50 dias de estocagem, com queda de até 50 % nos valores, após este período, ou manutenção dos valores iniciais.

Além disso, o fenômeno de aumento da solubilidade da madeira em água, no início do período de estocagem é explicado por SJÖSTRÖM (1993, p. 108) como sendo resultado da oxidação dos ácidos graxos dienóicos e trienóicos, por certas enzimas (liposidases), que tem como consequência o aumento da hidrofilia e solubilidade em água.

Com relação à variação do conteúdo de extrativos, somente o lote 2 teve perda crescente ao longo do tempo de estocagem, chegando ao final de seis meses com 31,52 % a menos de extrativos em relação aos valores iniciais. Este fenômeno pode ser devido à época de estocagem, onde o material foi coletado no verão, mas com predominância de estocagem durante o período de inverno, tendo as velocidades das reações químicas e físicas mais lentas, porém mais uniformes (GRÁFICO 1.5 ).

Os demais lotes tiveram aumento da solubilidade após dois meses, que variou de 11,15 % no lote 4 a 79,2 % no lote 3. Como no caso anterior, as condições climáticas podem ter sido responsáveis pelo comportamento dos lotes 1 e 4. Somente o lote 3 parece contrariar o comportamento dos lotes anteriores, pois mesmo tendo sido estocado predominantemente no período de inverno apresentou alta velocidade de reação no início do período de estocagem e perda contínua após dois meses de armazenamento (GRÁFICO 1.5 ).

GRÁFICO 1.5 – VARIAÇÃO DA SOLUBILIDADE EM ÁGUA QUENTE DA BIOMASSA FLORESTAL (TORAS DE *Pinus* E *Eucalyptus* E COSTANEIRAS DE *Pinus*) DURANTE O PERÍODO DE ESTOCAGEM EM CADA LOTE ANALISADO

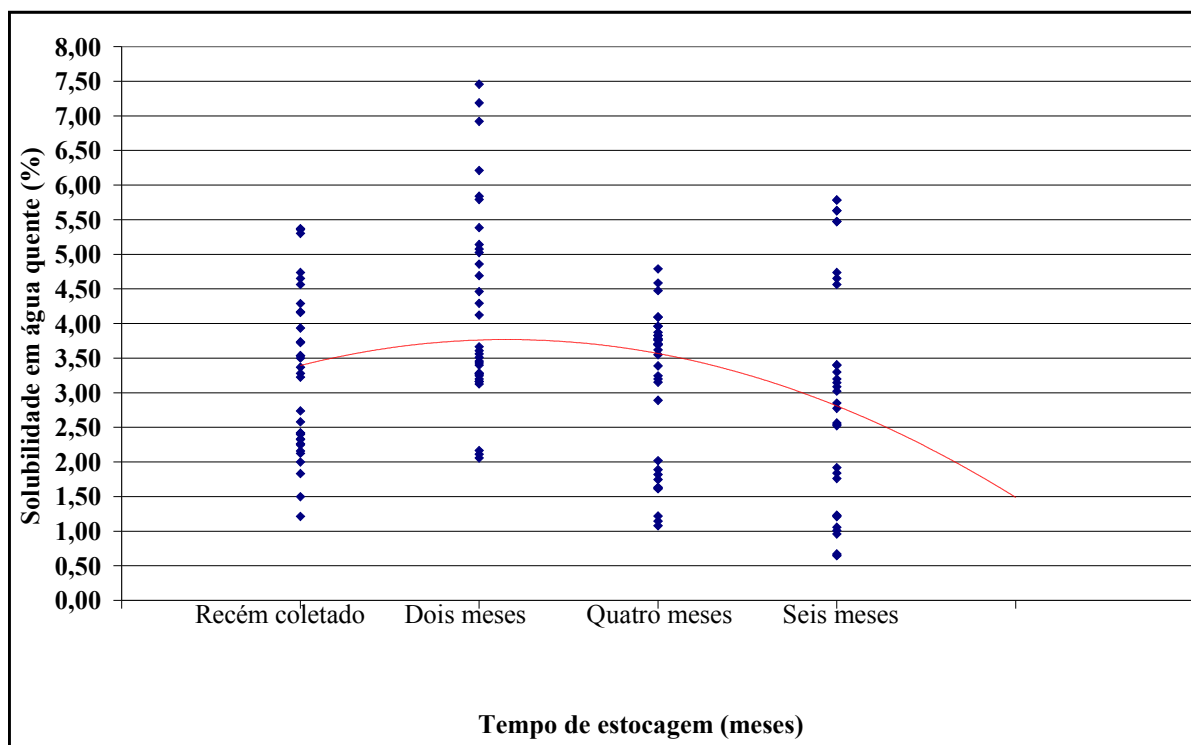


FONTE: O autor

A maior dispersão dos dados ocorreu aos dois meses de estocagem, sendo que os valores extremos observados variaram de 2,06 % a 7,46 %. Porém, mesmo eliminando-se os valores próximos de 7,00 %, que estão bem acima dos valores médios obtidos, ainda assim, o comportamento continua sendo o mesmo (GRÁFICO 1.6).

Da mesma forma que para o teor de umidade, outros fatores como a época de estocagem, espécie, forma e tamanho da biomassa influenciam sobre o comportamento da solubilidade dos extrativos em água fria e quente.

GRÁFICO 1.6 - VARIAÇÃO DA SOLUBILIDADE EM ÁGUA QUENTE DA BIOMASSA FLORESTAL (TORAS DE *Pinus* E *Eucalyptus* E COSTANEIRAS DE *Pinus*) DURANTE O PERÍODO DE ESTOCAGEM



FONTE: O autor

O tempo de estocagem também contribuiu para a variação da solubilidade da madeira com casca em hidróxido de sódio de forma significativa. Os valores extremos variaram desde 7,73 % em material com seis meses de estocagem a valores de 18,87 % na biomassa com dois meses de estocagem (TABELAS 1.9 e 1.10 – APÊNDICE II).

A biomassa recém colhida (14,56 % de solubilidade em hidróxido de sódio) foi diferente de todos os demais tempos de estocagem, sendo que o período de dois meses (12,46 %), quatro meses (12,34 %) e seis meses (12,64 %) foram iguais entre si.

Os resultados de solubilidade em hidróxido de sódio demonstram que as alterações químicas e físicas ocorridas na biomassa durante a estocagem são devidas somente à transformação, disponibilização e perda dos extrativos. Esta análise indireta indica ainda que não houve alteração da estrutura da parede celular de forma

significativa, resultantes tanto das reações químicas quanto pela ação de agentes degradadores biológicos.

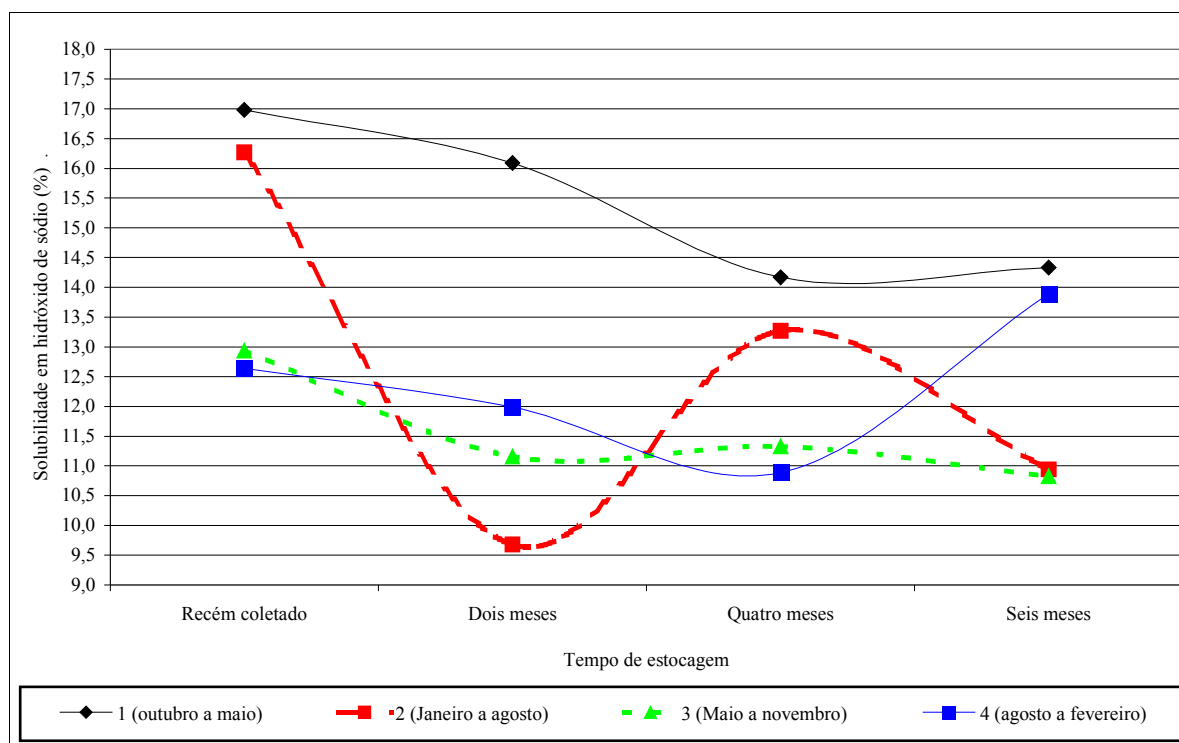
Esta afirmação é possível, pois a solução de álcali aquecido (NaOH a 1%) extrai carboidratos de baixo peso molecular, constituídos basicamente de polioses e celulose degradada. A solubilidade da madeira pode indicar o grau de degradação por fungos, calor, luz, oxidação, entre outros, sendo que na madeira degradada, a porcentagem de materiais solúveis em álcali aumenta (TAPPI, 1994c, p. 01). No entanto, nos resultados obtidos, a porcentagem de materiais solúveis em hidróxido de sódio diminuiu, indicando que houve somente perda dos componentes extrativos da madeira. Neste contexto, para todos os lotes avaliados houve diminuição dos compostos solúveis em hidróxido de sódio, ao longo do tempo de estocagem, em relação aos valores iniciais (testemunha).

Além disso, JOHNSON *et al*, citados por JIRJIS (1995, p. 186) e THÖRNQVIST (1986, p. 08) observaram que, em estocagem com períodos de até nove meses, não houve perdas significativas dos polissacarídeos e lignina na madeira.

Após a solubilidade em água fria, a solubilidade em hidróxido de sódio é que tem maior relação com o período de estocagem. Além disso, a linha de tendência do GRÁFICO 1.7 e os resultados obtidos indicam que os valores de solubilidade após seis meses aumentam, indicando o início do processo de biodegradação.

Neste sentido, aos seis meses de estocagem foi percebida a tendência de uma pequena elevação da solubilidade da madeira com casca (lotes 1 e 4), indicando que se o período de estocagem fosse estendido, a degradação biológica seria mais intensa, promovendo a perda de massa seca e degradação da estrutura da parede celular.

GRÁFICO 1.7 – VARIAÇÃO DA SOLUBILIDADE EM HIDRÓXIDO DE SÓDIO DA BIOMASSA FLORESTAL (TORAS DE *Pinus* E *Eucalyptus* E COSTANEIRAS DE *Pinus*) DURANTE O PERÍODO DE ESTOCAGEM EM CADA LOTE ANALISADO

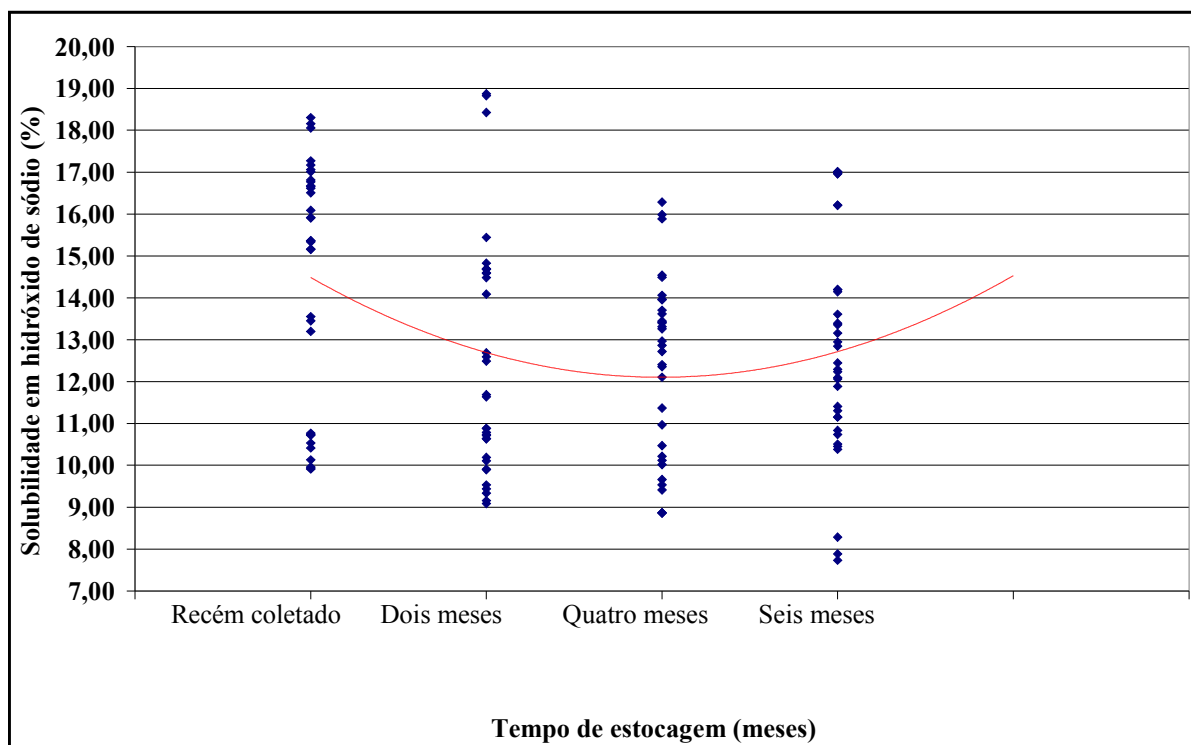


FONTE: O autor

Ainda no lote quatro, após seis meses de estocagem, foi observado um ganho de 9,89% em relação ao valor inicial. Isso porque para este lote, aos seis meses já estava iniciando o processo de biodegradação, com perdas dos componentes da parede celular. Este comportamento foi devido à época de estocagem, pois a biomassa foi predominantemente estocada durante o verão, onde as condições de temperatura e umidade propiciam os processos de biodegradação da madeira. Para os demais lotes, as perdas de solubilidade variaram de 5,24% (lote 1) a 40,50% (lote 2) nos primeiros dois meses de estocagem, e de 16,31% (lote 3) a 32,76% (lote 2) aos seis meses de estocagem, em relação aos valores obtidos para a biomassa no estado recém colhida (GRÁFICO 1.8).



GRÁFICO 1.8 - VARIAÇÃO DA SOLUBILIDADE EM HIDRÓXIDO DE SÓDIO DA BIOMASSA FLORESTAL (TORAS DE *Pinus* E *Eucalyptus* E COSTANEIRAS DE *Pinus*) DURANTE O PERÍODO DE ESTOCAGEM



FONTE: O autor

A maior variação nos dados foi observada aos dois meses de estocagem, com valores entre 9,09 a 18,87 %.

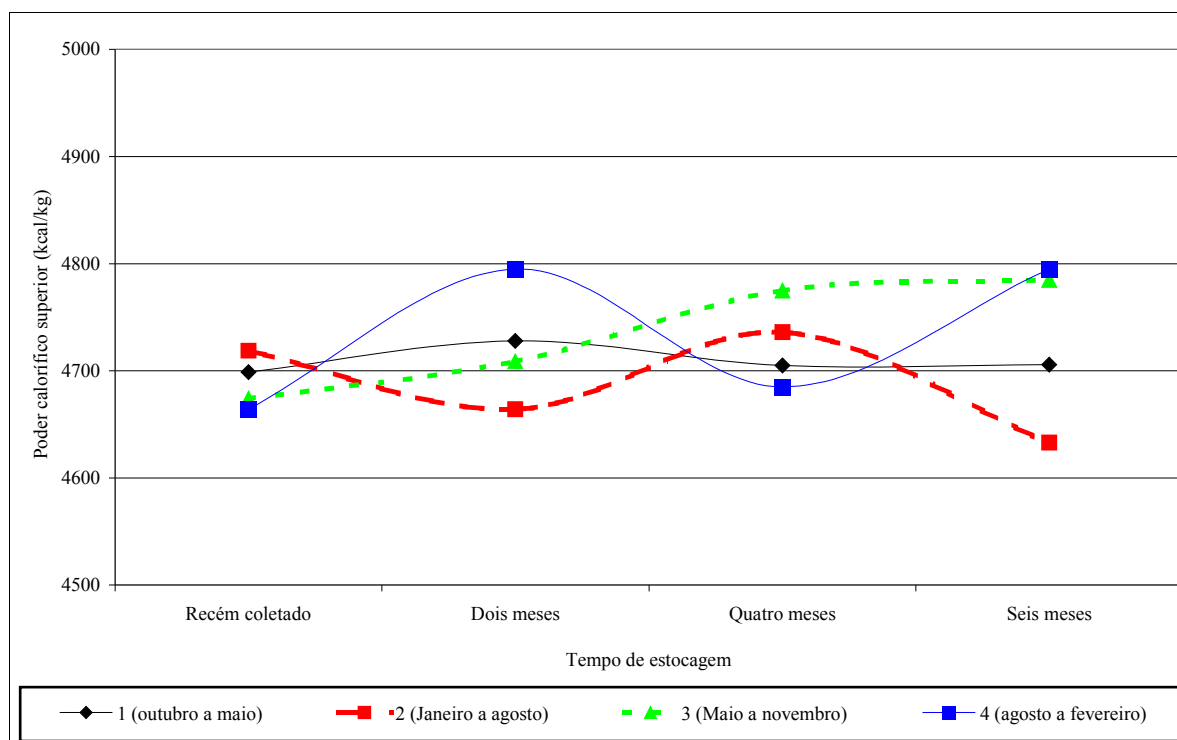
De forma geral, a composição química da madeira não pode ser utilizada de forma isolada para a determinação do tempo ideal de estocagem. Isso porque, estas propriedades se relacionam com as demais como o teor de umidade e poder calorífico, em maior ou menor intensidade, e que têm relação mais direta com o tempo de estocagem. Além disso, os fatores época, espécie, tamanho e forma da biomassa também têm influência sobre o tempo de estocagem. Desta forma, estas propriedades são utilizadas para a análise das variações dos componentes constituintes da parede celular ou que ficam no lúmen das células, e que por sua vez indicam se a biomassa terá variações no comportamento das outras propriedades avaliadas.

### 4.3 Poder calorífico

O tempo de estocagem demonstrou não ter influência sobre o poder calorífico superior da biomassa florestal (TABELAS 1.11 e 1.12 – APÊNDICE II e TABELA 17), de acordo com o que foi observado nos trabalhos de THÖRNQVIST (1985, 1986), NURMI (1990, 1995) e JIRJIS (2005). Os valores extremos variaram entre 4462 kcal/kg a 4927 kcal/kg, ambos os valores observados no material recém colhido. O maior valor médio foi encontrado na biomassa com seis meses de estocagem (4739 kcal/kg) e o menor no material com quatro meses de estocagem (4724 kcal/kg).

O lote com maior ganho no conteúdo energético, em menor tempo de estocagem foi o quatro, com acréscimo de 2,81% no poder calorífico superior nos dois primeiros meses de estocagem, seguido do lote 1 com 0,62% de aumento no poder calorífico, também com 2 meses de armazenamento (GRÁFICO 1.9). Os valores obtidos no trabalho foram superiores aos obtidos por THÖRNQVIST (1985, 1986) e GARSTANG *et al* (2002). Este último autor registrou 0,5% de ganho no poder calorífico após 5,5 meses de estocagem, sendo que aqui foram observados valores entre 1,82 % a 2,79 %.

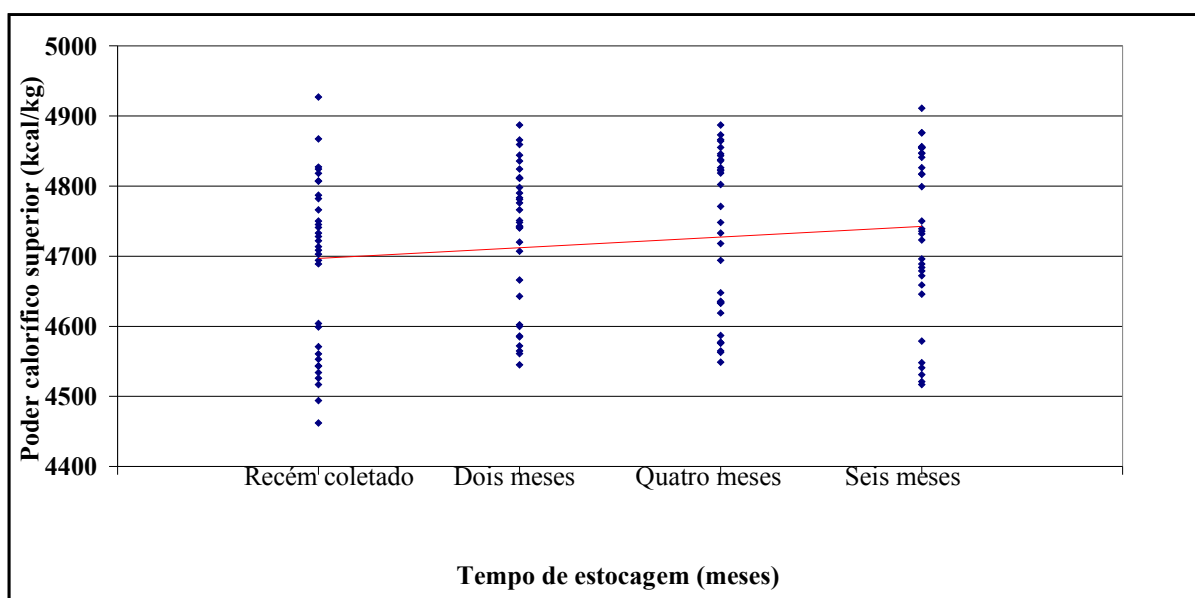
GRÁFICO 1.9 – VARIAÇÃO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR (KCAL/KG) DA BIOMASSA FLORESTAL (TORAS DE *Pinus* E *Eucalyptus* E COSTANEIRAS DE *Pinus*) DURANTE O PERÍODO DE ESTOCAGEM EM CADA LOTE ANALISADO



FONTE: O autor

Apesar de não ter havido influência do tempo de estocagem no poder calorífico superior, durante um período de seis meses, pode-se verificar no GRÁFICO 1.10, uma leve tendência de aumento do poder calorífico superior em relação ao tempo de estocagem. Assim, pode-se esperar que o poder calorífico superior aumente até determinado limite, antes da degradação dos constituintes da parede celular, principalmente da lignina, seguido do decréscimo do mesmo.

GRÁFICO 1.10 - VARIAÇÃO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR DA BIOMASSA FLORESTAL (TORAS DE *Pinus* E *Eucalyptus* E COSTANEIRAS DE *Pinus*) DURANTE O PERÍODO DE ESTOCAGEM EM CADA LOTE ANALISADO



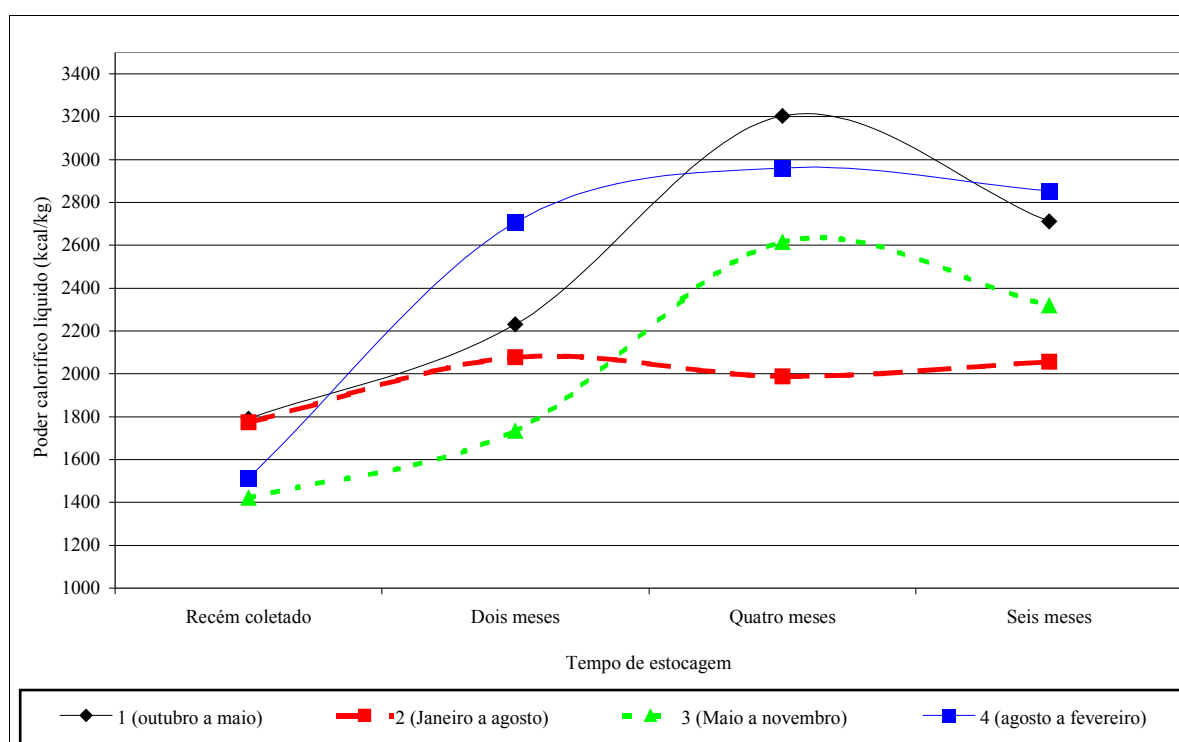
FONTE: O autor

Com relação ao poder calorífico líquido, houve diferença significativa desta variável em função do tempo de estocagem (TABELAS 1.13 e 1.14 – APÊNDICE II). Os valores extremos variaram de 1195 kcal/kg (65 %TU), em material recém colhido, até 3798 kcal/kg (14 % TU), observado em material com dois meses de estocagem. O poder calorífico líquido médio mais baixo foi registrado no material recém-coletado (1611 kcal/kg, com teor de umidade médio de 56 %), sendo diferente estatisticamente de todos os demais períodos de estocagem. Foram também diferentes entre si os períodos de dois e quatro meses, com valores médios de 2197 (44 % TU) e 2756 kcal/kg (33 % TU). O período de seis meses foi igual a dois e quatro meses, com valor médio de 2523 kcal/kg (38 % TU).

O lote 4 teve o melhor desempenho em relação ao ganho de poder calorífico líquido. Com dois meses de estocagem houve um ganho 78,85 % em relação ao valor inicial. Com quatro meses, este lote teve um aumento de 95,64 %. O lote 1 foi o segundo melhor desempenho com ganho de 24,58 % com dois meses, e 79 % aos

quatro meses, e o lote 3 teve ganho de 21, 94 % aos dois meses, e 83,97 % com quatro meses, em relação aos valores iniciais (GRÁFICO 1.11).

GRÁFICO 1.11 – VARIAÇÃO DO PODER CALORÍFICO LÍQUIDO (kcal/kg) DA BIOMASSA FLORESTAL (TORAS DE *Pinus* E *Eucalyptus* E COSTANEIRAS DE *Pinus*) DURANTE O PERÍODO DE ESTOCAGEM EM CADA LOTE ANALISADO



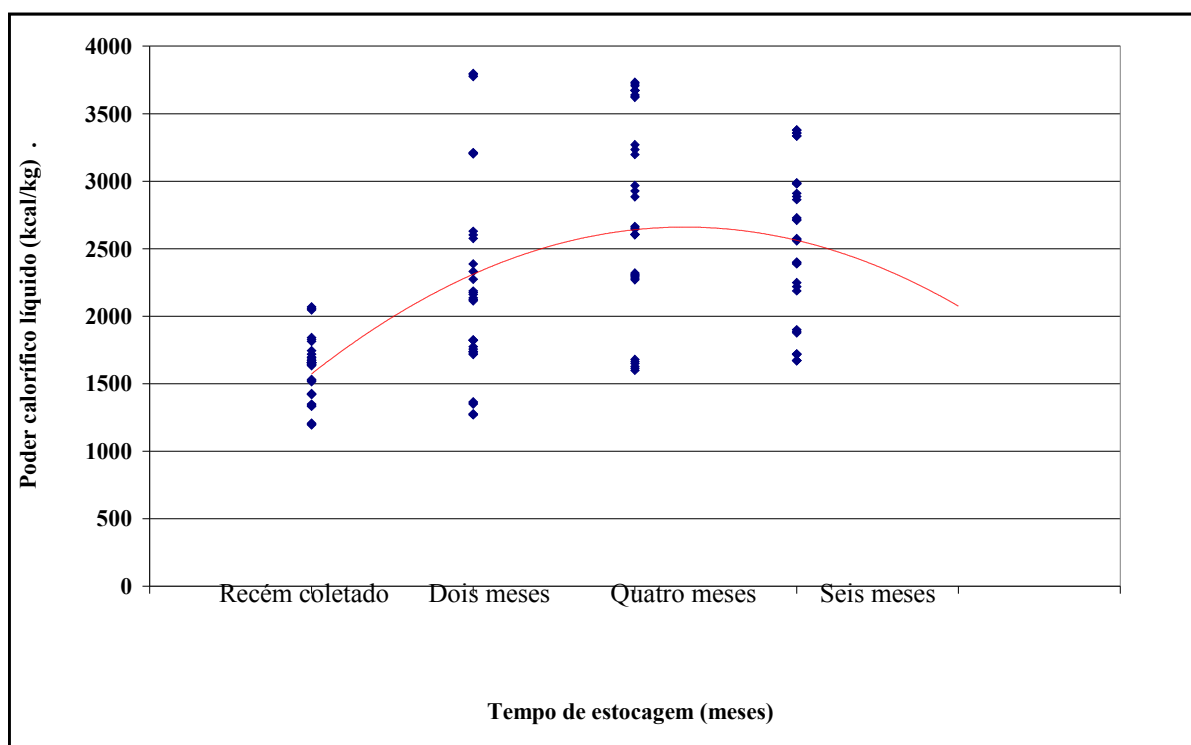
FONTE: O autor

Os valores observados de poder calorífico líquido estão de acordo com os obtidos por BRITO e BARRICHELO (1982, p. 106), BRITO (1986, p. 191), que verificaram valores de 2200 a 2500 kcal/kg para 40% de umidade, NOGUEIRA e LORA (2003, p. 53) e TEIXEIRA e LORA (2004), que mencionaram o valor de 1361 kcal/kg para um teor de umidade de 62% e LEHTOVAARA (2004) que obteve poder calorífico líquido de 1910 a 2508 kcal/kg para material com 45 % de umidade, e 1194 a 1672 kcal/kg para material com 60 % de umidade<sup>18</sup>.

<sup>18</sup> As informações obtidas na literatura referem-se a valores de poder calorífico médio de várias espécies florestais analisadas, sendo que muitos autores, não relacionam as espécies estudadas.

O comportamento do poder calorífico líquido foi similar ao do teor de umidade, conforme esperado (GRÁFICO 1.12).

GRÁFICO 1.12 - VARIAÇÃO DO PODER CALORÍFICO LÍQUIDO DA BIOMASSA FLORESTAL (TORAS DE *Pinus* E *Eucalyptus* E COSTANEIRAS DE *Pinus*) DURANTE O PERÍODO DE ESTOCAGEM



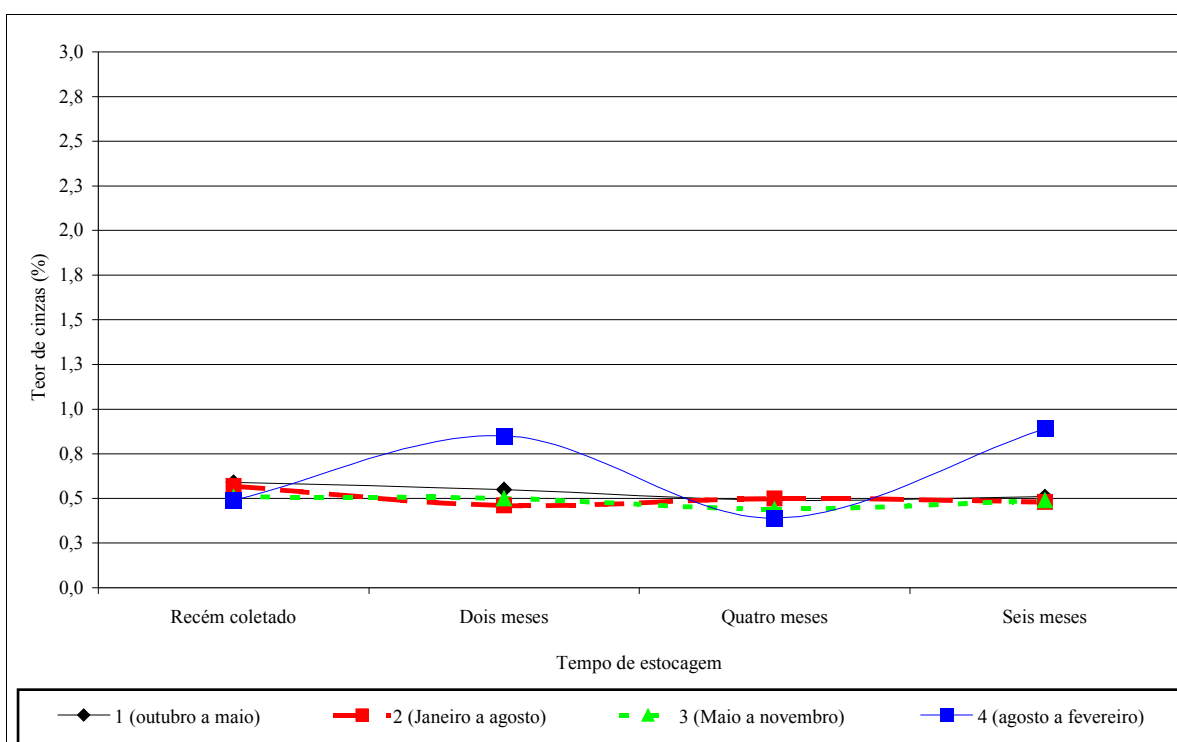
FONTE: O autor

Considerando-se o poder calorífico líquido, já que o poder calorífico superior não tem variação significativa em função do tempo de estocagem, o tempo ideal varia de dois a quatro meses, dependendo da época em que a mesma é realizada. Além disso, juntamente com esta informação técnica, as questões que determinarão o tempo de estocagem serão os custos de imobilização da matéria-prima, o espaço disponível e a demanda por energia.

#### 4.4 Teor de cinzas

O teor de cinzas da biomassa não é alterado em função do tempo de estocagem. (TABELAS 1.15 e 1.16 – APÊNDICE II, e GRÁFICO 1.13), concordando com JIRJIS (2005). Os valores extremos variaram entre 0,23 %, em material com quatro meses de estocagem até 1,98 % em material com seis meses de estocagem. O valor médio obtido para o material recém-coletado foi de 0,54 %, com dois meses 0,60 %; quatro meses com 0,45 % e seis meses 0,60 % de teor de cinzas (GRÁFICO 1.14). Os valores obtidos são inferiores aos observados por THÖRNQVIST (1985, 1986); GARSTANG *et al* (2002) e JIRJIS (2005).

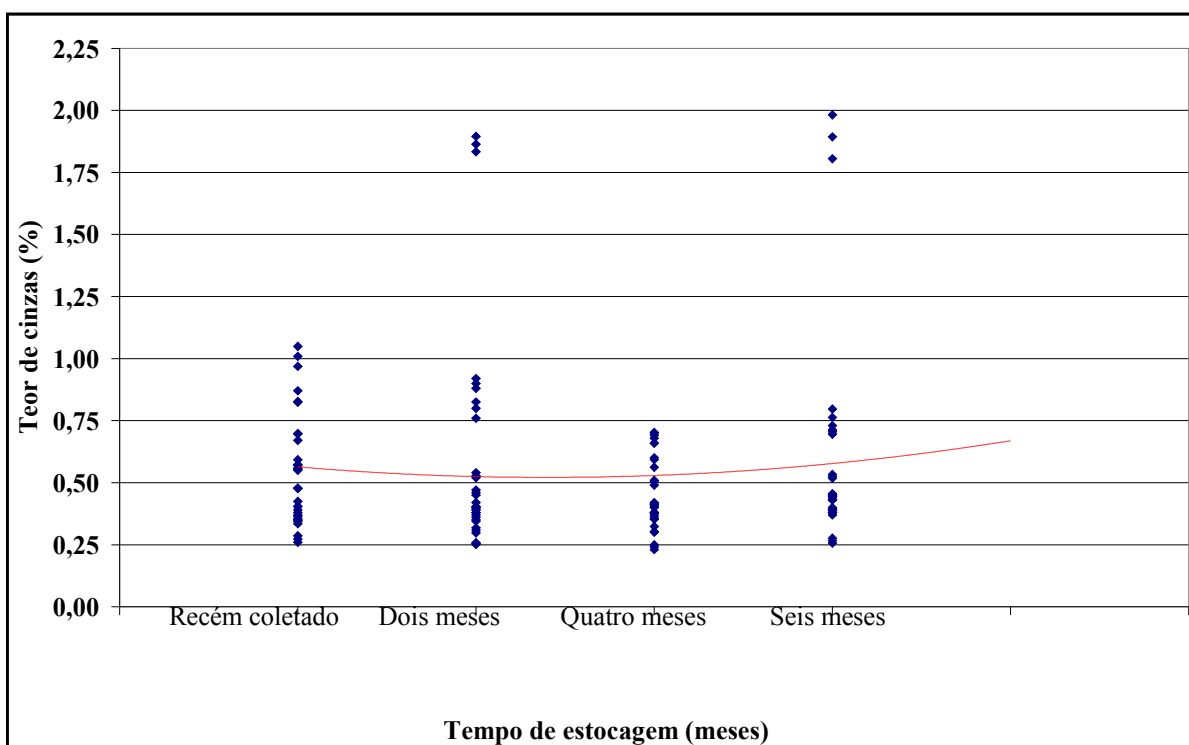
GRÁFICO 1.13 – VARIAÇÃO DO TEOR DE CINZAS DA BIOMASSA FLORESTAL (TORAS DE *Pinus* E *Eucalyptus* E COSTANEIRAS DE *Pinus*) DURANTE O PERÍODO DE ESTOCAGEM EM CADA LOTE ANALISADO



FONTE: O autor

Devido a não ocorrerem alterações na composição da estrutura celular da madeira, verificada pelos resultados obtidos na solubilidade em hidróxido de sódio, o teor de cinzas não foi aumentado, como menciona GARSTANG *et al* (2002).

GRÁFICO 1.14 - VARIAÇÃO DO TEOR DE CINZAS DA BIOMASSA FLORESTAL (TORAS DE *Pinus* E *Eucalyptus* E COSTANEIRAS DE *Pinus*) DURANTE O PERÍODO DE ESTOCAGEM



FONTE: O autor

GARSTANG *et al* (2002) menciona a tendência linear de aumento do teor de cinzas ao longo do tempo de estocagem, com 27 a 45% das variações explicadas pelo tempo de estocagem. No entanto, neste trabalho a tendência linear não se aplica, havendo uma tendência de aumento polinomial dos valores ao longo do tempo de estocagem.

## 5 CONCLUSÕES

- a) O tempo de estocagem, de zero a seis meses, teve influência sobre a qualidade da biomassa florestal para a geração de energia.



- b) O tempo de estocagem teve influência sobre o teor de umidade; solubilidade em água fria, quente e hidróxido de sódio e sobre o poder calorífico líquido, mas não provocou alterações significativas no poder calorífico superior e no teor de cinzas.
- c) O tempo de estocagem é influenciado pela época do ano em que a biomassa é armazenada.
- d) O tempo ideal de estocagem variou de dois a quatro meses, sendo de dois meses em épocas mais favoráveis (primavera e verão) e de quatro em épocas menos favoráveis (outono e inverno).

## 6 REFERÊNCIAS

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Aspectos técnicos da utilização da madeira e carvão vegetal como combustíveis. In: Seminário de Abastecimento Energético Industrial com Recursos Florestais, 2., 1982, São Paulo. **Anais...**São Paulo: Governo do Estado de São Paulo, 1982. p. 101-137.

BRITO, J.O. Madeira para energia: - a verdadeira realidade do uso de recursos florestais. **Silvicultura**. Ano XI. Edição especial. p. 188-193, 1986.

BROWNING, B.L. **The chemistry of wood**. New York, London: John Wiley & Sons. 1963. 689 p.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e. V. **DIN 51900**: Determining the gross calorific value of solid and liquid fuels using the bomb calorimeter, and calculation of net calorific value. Berlim, 2000.

EPAGRI. Estação meteorológica. Lages: Estação Experimental de Pesquisa Agropecuária de Lages. 2006.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood. Chemistry, Ultrastructure, reactions**. New York: de Gruyter, 1989. 613 p.

GARSTANG, J.; WEEKES, A.; POULTER, R.; BARTLETT, D. Identification and characterisation of factors affecting losses in the large-scale, non-ventilated bulkstorage of wood chips and development of best storage practices. FES B/W2/00716/RESP.DTI/Pub urn 02/1535, 2002. 116 p. Relatório técnico.

HILLEBRAND, K.; FLYKTMAN, M.; KALLIO, E. LEINONEN, A.; LINDH, T.; MARTTILA, M.; TIIHONEN, I. Production of multifuels on the terminal of peat production area. Jyväskylä Science Park. Project book, Part II, Peat and field biomass production. 1999.

JIRJIS, R. Effects of particle size and pile height on storage and fuel quality of comminuted *Salix viminalis*. **Biomass and Bioenergy**. v. 28, p. 193-201, 2005.

JIRJIS, R. Storage and drying of wood fuel. **Biomass and Bioenergy**. v. 9, issue 1-5, p. 181-190, 1995.

KLOCK, U.; MUÑIZ, G.I.B.; HERNANDEZ, J.A. Química da Madeira. **Série didática FUPEF**. 3 ed. Curitiba: FUPEF. 2006. 82 p.

LEHTOVAARA, J. Calorific value – Status of the standardisation. In: International Conference “Standardisation of solid biofuels, 6<sup>th</sup>-7<sup>th</sup> October, 2004, Leipzig, Germany. **Anais** eletrônicos... Disponível em: <<http://www.energetik-leipzig.de/BioNorm/conference.htm>> Acesso em: 10 out. 2005.

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

NURMI, J. Longterm storage of fuel chips in large piles. **Folia Forestalis**. Nº 767, p. 1-18, Agosto 1990.

NURMI, J. The effect of whole-tree storage on the fuelwood properties of short-rotation *Salix* crops. **Biomass and Bioenergy**. v. 8, issue 4, p. 245-249. 1995.

SJÖSTRÖM, E. **Wood chemistry. Fundamentals and applications**. 2 ed. Califórnia:Academic Press, 1993. 293 p.

Technical Association for the worldwide pulp, paper and converting industry. TAPPI standard Test Methods. **TAPPI 207**: Water solubility of wood. Atlanta. 1994a.

Technical Association for the worldwide pulp, paper and converting industry. TAPPI standard Test Methods. **TAPPI 211**: Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525°C. Atlanta. 1994b.

Technical Association for the worldwide pulp, paper and converting industry. TAPPI standard Test Methods. **TAPPI 212**: One percent sodium hydroxide solubility of wood and pulp. Atlanta. 1994c.

Technical Association for the worldwide pulp, paper and converting industry. TAPPI standard Test Methods. **TAPPI 257**: Sampling and preparing wood for analysis. Atlanta. 1994d.

Technical Association for the worldwide pulp, paper and converting industry. TAPPI standard Test Methods. **TAPPI 264**: Preparation of wood for chemical analysis (Including procedures of removal of extractive and determination of moisture content). Atlanta. 1994f.

TEIXEIRA, F. N.; LORA, E. E. S. Capítulo 2 - Suprimento energético para termelétricas. In: **LORA, E. E. S.; NASCIMENTO, M. A. R. Geração termelétrica. Planejamento, projeto e operação**. v. 1. Rio de Janeiro: Interciência, 2004. p. 31 – 86.

THÖRNQVIST, T. Drying and storage of forest residues for energy production. **Biomass**, England, v. 7, p. 125-134, 1985.

THÖRNQVIST, T. Energy change due to storage of logging residues. In: International conference on bioenergy, 1984, Göteborg. **Proceedings...**Sweden: Swedish University of Agricultural Sciences Department of Forest Products, 1984a. Research notes nº 152.

THÖRNQVIST, T. Projekt storskalig säsongslagring av trädbraänsle – en sammanfattning av etapp 1. Large-scale seasonal storage of tree fuel project – summary of phase 1. Sweden: The Swedish University of Agricultural Sciences. Department of Forest Products, 1986. 50 p. **Report nº 188**.

THÖRNQVIST, T. Storing of forest residues and comminuted fuels from forest residues. In: Conference held by the International Energy Agency (IEA) – Forestry Energy Programme Group C – Storing, drying and internal handling of wood fuels, 1984, Denmark. **Proceedings**.... Denmark: Danish Institute of Forest Technology, 1984b. p. 16 – 18.

THÖRNQVIST, T. Wood fuel storage in large piles – Mechanisms and risks of self-ignition. In: IEA/BE Conference Task III/Activity 6 and 7, 1988, Sweden. **Proceedings**... Sweden: Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Operational Efficiency, 1988. p. 193-198.

## **CAPÍTULO 2 - INFLUÊNCIA DA ÉPOCA DE COLHEITA E DE ESTOCAGEM SOBRE A QUALIDADE DA BIOMASSA FLORESTAL PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA**

### **RESUMO**

Este trabalho teve o objetivo de determinar a época de colheita e estocagem ideais para a utilização da biomassa florestal na geração de energia, através da análise da influência destes fatores sobre as propriedades físicas e químicas da madeira com casca. O experimento foi realizado no município de Lages, SC, entre outubro de 2003 e fevereiro de 2005. Foram utilizadas toras com casca de *Pinus taeda* e *Eucalyptus dunnii* e constaneiras de *Pinus*, que foram estocadas em pilhas, por um período de seis meses. O material para análise foi coletado no estado recém colhido, com dois, quatro e seis meses de estocagem. Foram utilizados quatro lotes para a análise da influência da época de colheita e estocagem. A colheita da biomassa foi feita nos meses de outubro, janeiro, maio e agosto. A época de estocagem foi avaliada com material que permaneceu sob estocagem entre os meses de outubro a maio; janeiro a agosto; maio a novembro e agosto a fevereiro. As propriedades avaliadas foram: teor de umidade na base úmida, poder calorífico superior e líquido, composição química (extrativos) e teor de cinzas. A época de colheita teve influência sobre o teor de umidade, solubilidade em hidróxido de sódio e poder calorífico líquido. As épocas mais favoráveis para a colheita foram a primavera e verão, e as menos foram o inverno e outono. A época de estocagem teve influência sobre as propriedades de teor de umidade, solubilidade em água fria, quente e hidróxido de sódio e sobre o poder calorífico líquido. As melhores épocas de estocagem foram entre outubro a maio e entre agosto a fevereiro. Portanto, a biomassa deve ser colhida na saída do inverno ou primavera e permanecer sob estocagem durante o verão.

Palavras-chave: época de colheita, época de estocagem, energia, *Pinus taeda*, *Eucalyptus dunnii*

### **ABSTRACT**

**INFLUENCE OF THE HARVEST TIME AND THE STORAGE SEASON OVER THE QUALITY OF WOOD FUEL.** The objective of this study was to determine the ideal harvest time and storage season in order to make use of the wood to generate energy, by means of the analysis of the influence of these factors over the physical and chemical properties of wood with bark. The experiment was accomplished in Lages, in the State of Santa Catarina, Brazil, from October 2003 to February 2005, employing *Pinus taeda* and *Eucalyptus dunnii* logs with barks and *Pinus* spp. edges, stored in piles, during six months. The material used for the analysis was collected in the state of fresh material, with two, four and six months of storing. Four lots of stored wood, according to the season of the year, were analyzed. The wood fuel was collected in October, January, May and August. The storage season was

evaluated with material kept among October and May, January and August; May and November and August and February. The evaluated properties were: moisture content; gross calorific value and net calorific value, wood chemical composition (extractives) and ash content. The harvest time affected the moisture content, sodium hydroxide solubility of wood and the net calorific value. The more convenient seasons for the harvest were Spring and Summer, and the list opportune ones were Winter and Autumn. The storage season influenced the properties of the moisture content, the water solubility of wood, the sodium hydroxide solubility of wood and the net calorific value. The best harvest time of the wood fuel was during Spring and Summer and the worst one was during Winter and Autumn. Concerning to the storage, the period from October to May and from August to February presented the best results. So, in the region where the study was accomplished, in order to get a better energetic yield, the wood fuel had to be harvested at the end of the Winter or in the Spring and be kept during Summer.

Key words: harvest time; storage season; energy, *Pinus taeda*, *Eucalyptus dunnii*

## 1 INTRODUÇÃO

A época de colheita e de estocagem são fatores que afetam a qualidade da biomassa florestal para a geração de energia<sup>19</sup>. A influência destas variáveis está relacionada às alterações das propriedades físicas e químicas da biomassa. Quando analisada a época de colheita, as alterações ocorrem devido às diferenças fisiológicas da planta em função das estações de crescimento e dormência. Quando o fator envolvido é a época de estocagem, o clima, em função principalmente da temperatura e precipitação, contribui para a variação da velocidade e intensidade das alterações nas propriedades da biomassa estocada.

Em se tratando de condições climáticas, estudos já realizados em países de clima temperado<sup>20</sup> demonstraram que a época do ano em que a estocagem é feita determina, em maior ou menor grau, o tempo necessário para que a biomassa florestal alcance as condições ótimas para a geração de energia. Além disso, o clima pode determinar a obrigatoriedade de realização da estocagem, principalmente em regiões onde as condições climáticas de determinada época do ano são tão adversas, que

---

<sup>19</sup> HEDING (1984), THÖRNQVIST (1984b), NURMI (1992, 1995), GARSTANG *et al* (2002).

<sup>20</sup> HEDING (1984); THÖRNQVIST (1984b); NURMI (1992, 1995) e GARSTANG *et al* (2002).

impedem a colheita ou acesso à biomassa (como por exemplo em regiões com inverno muito rigoroso ou estação de chuva bem definida e intensa).

No entanto, não é somente o clima que determina se a estocagem será ou não realizada. Outros fatores como sazonalidade na demanda e oferta de energia contribuem para a realização da estocagem de biomassa. Com relação à sazonalidade, alguns países têm maior demanda nos meses de inverno, principalmente se for necessário o uso de sistemas de aquecimento. Enquanto em outros, a demanda pode ser maior no verão. Este último exemplo se aplica ao Brasil, pois devido a maior parte da energia ser de origem hidrelétrica, em algumas regiões, em função da estiagem, o potencial de produção é diminuído, enquanto a demanda energética aumenta.

No caso específico da biomassa florestal, a oferta de determinado tipo de matéria-prima e seu preço podem determinar a realização da estocagem, independente da época do ano. Um exemplo usual disso é a estocagem da madeira na forma de toras, oriundas de desbastes. Em épocas onde estão sendo realizados desbastes de forma intensiva, pode haver no mercado grande disponibilização de toras com pequenos diâmetros. Estas por sua vez, não serão completamente absorvidas pelas indústrias de celulose e papel ou de painéis, fazendo seu valor de mercado diminuir. Assim, este material passa a ser utilizado no mercado de energia, propiciando a necessidade de estocagem, para regular o consumo pela planta geradora de energia.

Em última análise, a estocagem pode ser realizada independentemente dos fatores anteriormente mencionados. Neste caso, esta operação é realizada com o objetivo de controlar as propriedades físicas e químicas da biomassa, para melhorar seu desempenho nos processos de geração de energia.

Portanto, em todos os casos anteriormente mencionados, é importante determinar quais são as melhores épocas de colheita da biomassa e em que época a estocagem contribuirá de forma mais significativa para a melhoria das propriedades da matéria-prima, destinada à geração de energia. O conhecimento destes aspectos contribuirá ainda na determinação do tempo ideal de estocagem.

Assim, levando-se em consideração as questões mencionadas anteriormente, este capítulo teve o objetivo de determinar a época de colheita e estocagem ideais para a utilização da biomassa florestal na geração de energia, através da análise da

influência destes fatores sobre as propriedades físicas e químicas da biomassa importantes para o uso na geração de energia.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Influência da época de colheita sobre as propriedades da biomassa florestal

Segundo GARSTANG *et al* (2002, p. 17), a época de colheita está relacionada à estação de crescimento das árvores, dormência e estocagem de metabólitos. Estas variáveis, por sua vez, afetam as mudanças ocorridas na biomassa florestal durante a estocagem, devido principalmente às variações de teor de umidade e suscetibilidade à biodegradação.

Assim, o teor de umidade é o primeiro fator a ser avaliado com relação à influência da época de colheita sobre a biomassa florestal. Enquanto as árvores estão vivas, o conteúdo de umidade tanto de folhas, galhos, casca e madeira é alto. Porém, segundo HEDING (1984, p. 08), após a derrubada destas, inicia-se um processo de secagem natural ou biológica<sup>21</sup> até que a biomassa entre em equilíbrio com o ambiente.

Os teores de umidade observados em árvores de diferentes espécies, recém-colhidas, podem variar de 40 a 70 %<sup>22</sup>, sendo que, em alguns casos, estes estão próximos ou ultrapassam o teor de umidade crítico para o uso da biomassa na geração de energia. O conteúdo de umidade crítico, para fornos construídos para a queima de partículas verdes, como combustível, é o mais alto possível, ou seja, em torno de 60 %. Na prática, o valor a ser considerado pode ser de 50 % (HEDING, 1984, p. 07). Segundo GARSTANG *et al* (2002, p.15), o teor de umidade da biomassa florestal, para uso energético, deve ser igual ou inferior a 30 %. Portanto as operações aplicadas ao material destinado à geração de energia devem objetivar percentuais inferiores a este.

---

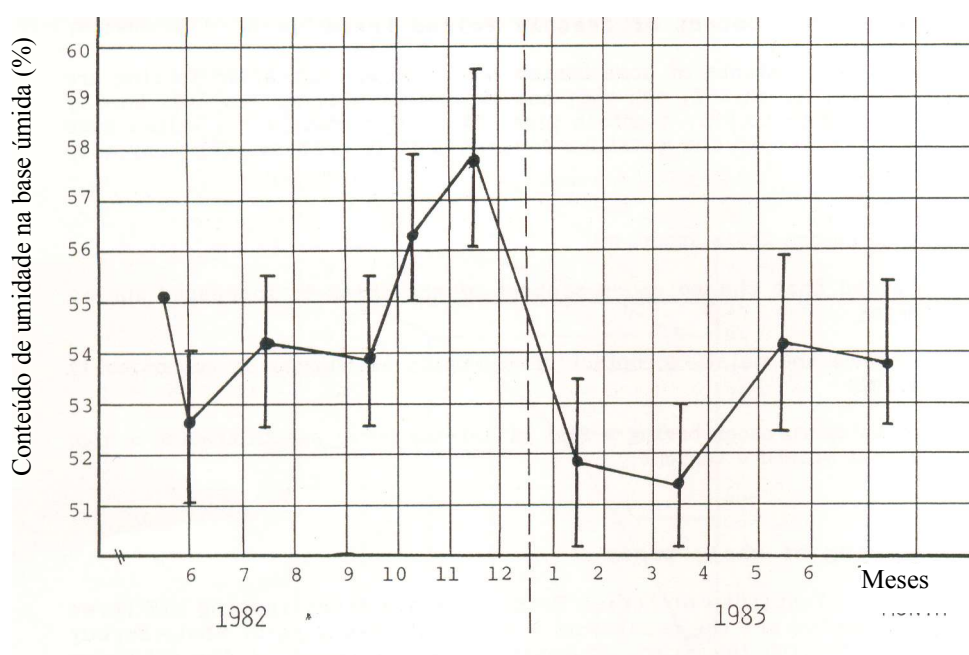
<sup>21</sup> Secagem biológica é definida como a secagem natural de árvores cortadas durante a estação de crescimento e deixadas com a copa e folhas para acelerar o processo de secagem. A árvore continua o processo de respiração e conseqüentemente consome parte da umidade contida na madeira.

<sup>22</sup> BRITO e BARRICHELO (1982), HEDING (1984), THÖRNQVIST (1984b), NURMI (1995).



HEDING (1984) e NURMI (1995) avaliaram a variação do teor de umidade em função da época de colheita da biomassa florestal, na Dinamarca e Finlândia, respectivamente. Ambos afirmaram que as variações observadas em função da época de colheita não foram significativas. Os resultados obtidos por HEDING (1984, p. 08) podem ser observados no GRÁFICO 2.1.

GRÁFICO 2.1 – INTERAÇÃO ENTRE CONTEÚDO DE UMIDADE DE ÁRVORES RECÉM CORTADAS E A DATA DA COLHEITA NA DINAMARCA (INTERVALO DE CONFIANÇA DE 95%)



FONTE: HEDING, N. The critical moisture content. In: Conference held by the International Energy Agency (IEA) – Forestry Energy Programme Group C – Storing, drying and internal handling of wood fuels, 1984, Denmark. **Proceedings....** Denmark: Danish Institute of Forest Technology, 1984. p. 08.

Através do GRÁFICO 2.1, pode-se perceber que os valores mais baixos foram obtidos na primavera (51,4%) e os valores mais altos no inverno (57,8%). Apesar da pequena variação do conteúdo de umidade, os resultados indicaram que a melhor época de colheita, na Dinamarca, é na saída do inverno ou início da primavera, quando os conteúdos de umidade são menores. Isso porque, partindo-se de um teor de umidade

menor, a energia gasta para secar a biomassa, ou mesmo o tempo de estocagem, no caso da realização deste pré-tratamento será menor.

Juntamente com o teor de umidade, a quantidade de extrativos presentes na biomassa pode sofrer variações em função da época de colheita. Segundo GARSTANG *et al* (2002, p. 77), colheitas feitas no verão, incluindo toda a copa da árvore tem maior conteúdo de umidade e maior quantidade de carboidratos solúveis. A casca estoca proteínas durante o outono e inverno, e declina novamente na primavera com a retomada do crescimento dos brotos e aumento do comprimento dos dias. Além disso, o xilema da madeira, não ativo fisiologicamente, tem concentração mais baixa de carboidratos solúveis em água em comparação com as células vivas do câmbio e floema (NURMI, 1992, p. 165 e GARSTANG *et al*, 2002, p. 16).

A quantidade de extrativos obtidos na madeira é relativamente pequena se comparada à quantidade obtida na casca e folhagem. Na madeira, os valores obtidos variaram de 3,5 a 5,4 % para coníferas e 4,4 a 7,5 % para folhosas (NURMI, 1992, p. 168). Antes do processo de estocagem GARSTANG *et al* (2002, p. 58) encontrou valores entre 0,4 a 1,94 % para extrativos solúveis em água para madeira de *Salix* com 3 anos de idade, colhida no inverno, e 0,4 a 2,4 % para madeira de resíduos florestais.

SWAN<sup>23</sup>, citado por FENGEL e WEGENER (1989) observou variação sazonal na composição dos ácidos graxos totais na madeira de *Picea* spp. com a presença de ácidos de cadeia curta durante o início de verão e um aumento do ácido linoleico (C<sub>18</sub>:3) durante a época de inverno. Ao contrário, EKMAN *et al*<sup>24</sup>, citados por FENGEL e WEGENER (1989) não encontraram variação nos ácidos graxos na mesma espécie de madeira durante diferentes estações do ano. Estes interpretaram os resultados do estudo anterior como variações devidas a coleta feita em diferentes árvores.

Quanto ao poder calorífico superior, tem-se verificado que os valores de poder calorífico superior da madeira variam de 3500 a 5000 kcal/kg<sup>25</sup>. Para biomassa recém

<sup>23</sup> SWAN, B. Svensk Papperstid. 71, p. 436-440.

<sup>24</sup> EKMAN, R.; PELTONEN, C.; HIRVONEN, P.; PENSAR, G. and VON WEISSENBERG, K. *Acta. Acad. Abo. Ser. B* 39, n 8. 1979. p. 1-26.

<sup>25</sup> BRITO e BARRICHELO (1982); THÖRNQVIST (1986); MARTÍN (1997); NURMI (1990, 1992, 1995); ANTUNES e ALMEIDA (2003); NOGUEIRA e LORA (2003); TEIXEIRA e LORA (2004) e QUIRINO *et al* (2004).

colhida, foram observados valores médios de poder calorífico superior de 4839 kcal/kg para madeira; 5008 kcal/kg para acículas; 4925 kcal/kg para casca (THÖRNQVIST e GUSTAFSSON<sup>26</sup>, citados por THÖRNQVIST, 1985, p. 130). No trabalho de NURMI (1995, p. 246) foi encontrado o valor médio de 4777 kcal/kg, para a madeira do gênero *Salix*, contendo casca. NURMI (1990, p. 13) observou valores em torno de 4800 kcal/kg em cavacos de *Betula pubescens*. Para resíduos florestais e *Quercus*, THÖRNQVIST (1986, p. 07) obteve valores entre 4600 a 5000 kcal/kg.

Para o poder calorífico líquido, NURMI (1995, p. 247) obteve valores de 3800 kcal/kg para a madeira de *Salix* com casca, com teores de umidade de 54 %. Em cavacos de *B. pubescens*, os valores foram em torno de 4300 kcal/kg, no material com teor de umidade médio de 31 % (NURMI, 1990, p. 13). No entanto, estes valores são muito altos quando comparados a dados apresentados por BRITO e BARRICHELO (1982); BRITO (1986), NOGUEIRA e LORA (2003); TEIXEIRA e LORA (2004) e LEHTOVAARA (2004) que mencionam valores entre 1700 a 2270 kcal/kg para material com 50 % de umidade e 2700 a 3300 kcal/kg para material com 30 % de umidade.

Quanto ao teor de cinzas, JIRJIS (2005, p. 199) observou valores médios de 1,89 % para ramos de *Salix*, na forma de partículas, THÖRNQVIST (1986) encontrou valores entre 0,9 a 1,5 % de teor de cinzas para partículas de *Quercus* e de 1,8 a 2,4 % para resíduos florestais. Para esta variável também não foram encontradas referências com relação à influência da época de colheita sobre a variação nos valores de cinzas da biomassa. BRITO e BARRICHELO (1982, p. 110) mencionam ainda valores de 0,41 a 0,53 % para espécies de *Eucalyptus* com quatro anos de idade.

## 2.2 Influência da época de estocagem sobre as propriedades da biomassa florestal

A época do ano tem influência sobre o comportamento da biomassa florestal durante a estocagem<sup>27</sup>. Segundo HEDING (1984, p. 10) (GRÁFICO 2.2), NURMI

<sup>26</sup> THÖRNQVIST, T.; GUSTAFSSON, G. **The importance of air drying for the storing property of fuel chips (English summary)**. 1983. Report. N. 142.

<sup>27</sup> HEDING (1984); NURMI (1995); THÖRNQVIST (1984b, 1985); GARSTANG *et al* (2002).

(1995, p. 249) e JIRJIS (1995, p. 185), na Dinamarca, Finlândia e Suécia, respectivamente, a secagem da biomassa florestal, tanto de árvores isoladas, toras e resíduos florestais em pilhas é mais rápida nos meses de verão, ocorrendo re-umidecimento do material durante o outono e inverno, se a estocagem ultrapassar os meses mais favoráveis à secagem, ou em épocas de maior umidade.

THÖRNQVIST (1984b, p. 16) também observou este fenômeno, na Suécia, quando resíduos de colheita florestal de *Picea* e *Pinus* foram processados durante o inverno e deixados na área de colheita. Nesta condição, o conteúdo de umidade diminuiu durante o verão (26 a 29 %) e aumentou novamente no outono (40 a 46 %). Porém, quando estes resíduos foram processados, coletados e empilhados no local de uso final, o conteúdo de umidade decresceu para teores entre 40 a 45 %, durante o verão e outono.

Além disso, o tamanho da pilha também contribui para a velocidade de secagem do material estocado. Em pilhas pequenas, em torno de 120 m<sup>3</sup>, ocorre maior variação de teor de umidade em função da época de estocagem (NYLINDER e THÖRNQVIST<sup>28</sup>, citados por THÖRNQVIST (1985, p. 128)), sendo que o conteúdo de umidade decresceu de aproximadamente 50% para 40%, depois de um inverno e verão estocados, na Suécia. JIRJIS (1995, p. 184) complementa que o conteúdo de umidade da biomassa na forma de toras decresce rapidamente se o material é estocado em pequenas pilhas durante o verão, com maior risco de re-umidecimento no caso de épocas de alta umidade.

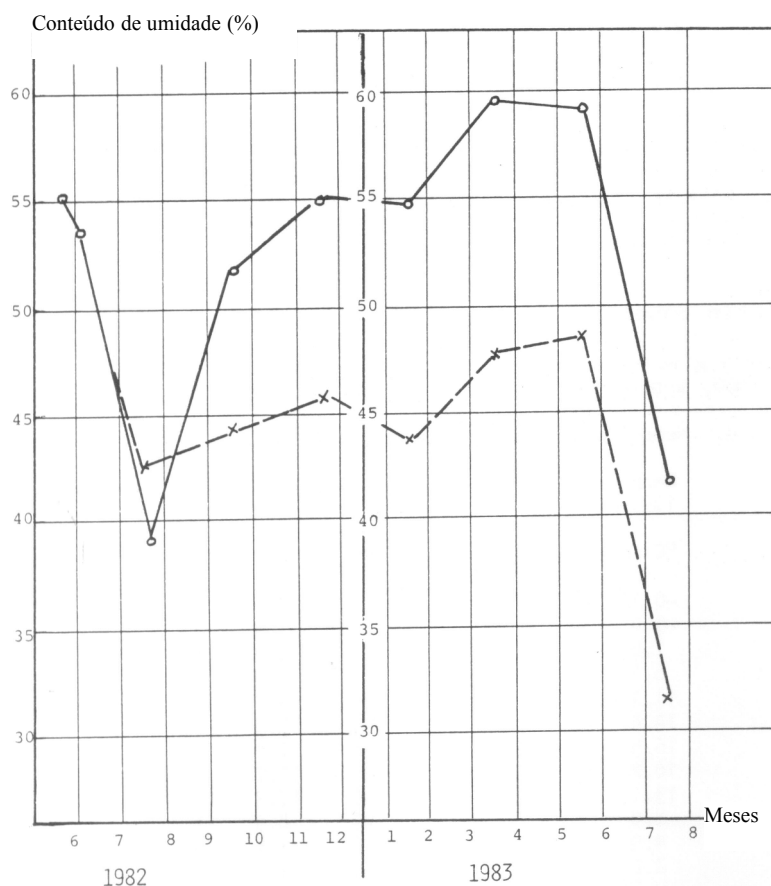
Em grandes pilhas, em torno de 600 m<sup>3</sup>, a variação do teor de umidade em função da época é menor, havendo maior homogeneidade no teor de umidade (THÖRNQVIST<sup>29</sup>, citado por THÖRNQVIST (1985, p. 128)).

---

<sup>28</sup> NYLINDER, M.; THÖRNQVIST, T. **Storing of branches and tops of different fractions (English summary)**. 1981. Report n° 113.

<sup>29</sup> THÖRNQVIST, T. **Drying of fuel chips with solar panel warmed air (English summary)**. Department of Forest Products, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala. 1982. Report n. 126.

GRÁFICO 2.2 – RELAÇÃO ENTRE A ESTAÇÃO DO ANO E O TEMPO DE SECAGEM. ÁRVORES INTEIRAS DE *Picea abies* (L.) KARST, ESTOCADAS DE DUAS FORMAS (O = EM PILHAS OU FARDOS, X = ISOLADAS)



FONTE: HEDING, N. The critical moisture content. In: Conference held by the International Energy Agency (IEA) – Forestry Energy Programme Group C – Storing, drying and internal handling of wood fuels, 1984, Denmark. **Proceedings....** Denmark: Danish Institute of Forest Technology, 1984. p. 08.

Com relação ao poder calorífico, a biomassa oriunda da colheita florestal na Escandinávia, que foi produzida e coletada durante o inverno, teve aumento do seu conteúdo energético, quando estocada em grandes pilhas, nos estaleiros das áreas de colheita, por períodos de tempo entre três a nove meses. Até certo ponto, este aumento é devido à secagem do material, ao mesmo tempo em que a perda de massa é pequena (THÖRNQVIST, 1984a, p. 04).

Porém se a biomassa é produzida no inverno e permanece na área de colheita até o verão, antes da coleta e transformação em partículas, então o conteúdo de energia

não é alterado. No entanto, se a coleta e a redução da biomassa florestal forem realizadas antes do inverno, o conteúdo de energia diminui. Em suma, do trabalho desenvolvido por THÖRNQVIST (1984a, p. 07) pode-se concluir que se a biomassa for produzida no inverno e estocada até o verão, em maiores dimensões, não existe alteração no poder calorífico, sendo que a estocagem durante o inverno promove ganhos energéticos, enquanto que, se o material for reduzido em partículas antes do inverno existem perdas energéticas.

THÖRNQVIST (1986, p.07) complementa que as variações energéticas dependem ainda das diferentes espécies de árvores e conteúdos de umidade no momento da confecção das pilhas e também dos diferentes métodos de preparação das pilhas.

De forma geral, os trabalhos que avaliam a época de estocagem não levam em consideração a sua influência sobre a variação dos extrativos e do teor de cinzas.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

A avaliação da influência da época de colheita e de estocagem sobre a qualidade da biomassa florestal foi realizada em toras com casca das espécies de *Pinus taeda* e *Eucalyptus dunnii*, com diâmetros variados<sup>30</sup> e comprimento médio de 2,4 m. Além das toras foram utilizadas costaneiras<sup>31</sup>, contendo ou não casca, da espécie *Pinus taeda*, com comprimento médio de 2 m. O estudo foi realizado na cidade de Lages, Estado de Santa Catarina, entre outubro de 2003 a fevereiro de 2005. Os dados meteorológicos do período de estudo estão apresentados na TABELA 2.1.

---

<sup>30</sup> Os diâmetros das toras utilizadas no estudo variaram de 8 a mais de 30 cm, pois o material de estudo foi constituído de madeira destinada à geração de energia (toras finas) e toras descartadas em processos industriais (toras grossas), sendo que esta variável não foi controlada no estudo.

<sup>31</sup> Costaneira é a nomenclatura dada às peças em forma de meia lua, obtidas na transformação de toras em blocos ou semi-blocos, através de serras de desdobro primário.

TABELA 2.1 – CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DA REGIÃO DE LAGES- OUTUBRO DE 2003 A FEVEREIRO DE 2005.

DADOS	ANO																
	2003			2004												2005	
	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev
Precipitação (mm)	119	94	225	81	114	144	82	103	28	233	52	278	162	104	136	147	47
Temperatura (°C)	18	19	20	21	21	20	19	13	13	12	14	17	17	19	20	22	22
Umidade relativa (%)	76	72	79	78	76	77	83	85	82	84	77	82	75	76	76	76	75

FONTE: EPAGRI

NOTA: A precipitação total do ano de 2004 foi de 1517 mm, e os valores médios de temperatura e umidade relativa foram 17°C e 79%, respectivamente.

Os dados meteorológicos foram levantados para o conhecimento das condições climáticas no período de realização do estudo. Isto é importante, pois os resultados obtidos em estudos de estocagem devem ser apresentados mencionando-se às condições climáticas observadas durante o período de análise, possibilitando assim estudos comparativos com outras regiões.

Os dados apresentados refletem as condições climáticas de anos típicos na região, porém não foram utilizados em cruzamentos com os dados obtidos nas análises realizadas, por não se constituir em objeto do estudo.

Para avaliar a época de colheita foram realizadas coletas em outubro de 2003 (lote 1), janeiro (lote 2), maio (lote 3) e agosto de 2004 (lote 4). Com relação à época de estocagem cada lote permaneceu sob armazenamento durante seis meses, sendo realizadas amostragens para análise na biomassa recém colhida, com dois, quatro e seis meses de permanência no campo experimental. O delineamento, com relação à época de colheita e estocagem pode ser visualizado na TABELA 2.2.

TABELA 2.2 – DELINEAMENTO EXPERIMENTAL DA ESTOCAGEM DE BIOMASSA FLORESTAL EM FUNÇÃO DA ÉPOCA DE COLHEITA E DE ESTOCAGEM

LOTE	ÉPOCA DE ESTOCAGEM	MESES DE COLETA	NÚMERO DE DIAS DE ESTOCAGEM <sup>32</sup>
1	Outubro/2003 a maio/2004	Outubro Novembro Março Maio	Recém-coletado 31 dias (20 dias - costaneira) 139 dias (128 dias – costaneira) 200 dias (180 dias – costaneira)
2	Janeiro/2004 a agosto/2004	Janeiro Abril Junho Agosto	Recém-coletado 69 dias 127 dias 190 dias
3	Maio/2004 a novembro/2004	Maio Junho Setembro Novembro	Recém-coletado 49 dias 124 dias 180 dias
4	Agosto/2004 a Fevereiro/2005	Agosto Outubro Novembro Fevereiro	Recém-coletado 56 dias 105 dias 183 dias

FONTE: O autor.

Cada um dos três materiais avaliados foi estocado, separadamente, em pilhas com dimensões médias de 6 m de comprimento, 2,5 m de largura e 2,5 m de altura, e volume aproximado de biomassa de 10 m<sup>3</sup>. Entre uma pilha e outra foi deixado um espaço de 3,5 m para facilitar a coleta e propiciar aeração.

As pilhas foram construídas de forma que o comprimento das toras ficasse no sentido leste-oeste, para que houvesse máxima radiação solar sobre a superfície das mesmas, conforme orientação de HILLEBRAND *et al.* (1999). Este autor afirma que a construção das pilhas de estocagem tem efeito significativo sobre a homogeneidade da secagem de resíduos de colheita. Os detalhes da montagem das pilhas e posicionamento destas no pátio são apresentados nas Fotos do APÊNDICE I.

Em cada amostragem foram coletadas toras com casca e costaneiras na base, meio e topo das pilhas. Sem haver remoção da casca, as toras e costaneiras foram

<sup>32</sup> A variação observada no tempo de coleta, em dias, foi devida a condições climáticas adversas, falta de pessoal; indisponibilidade de máquinas para a confecção das pilhas, coleta ou transporte do material, ou outros fatores de força maior.



transformadas em cavacos, nos quais foram realizadas as determinações das propriedades físicas e químicas da biomassa florestal<sup>33</sup>.

O teor de umidade na base úmida<sup>34</sup> foi determinado nos cavacos recém produzidos. Para as análises químicas, os cavacos foram secados e transformados em serragem, de acordo com as Normas TAPPI 257 (*Sampling and preparing wood for analysis*) e TAPPI 264 (*Preparation of wood for chemical analysis-Including procedures of removal of extractive and determination of moisture content*). Após esta preparação, foram determinados o poder calorífico superior e líquido, solubilidade em água fria, quente e hidróxido de sódio, além do teor de cinzas.

O teor de umidade na base úmida foi determinado através da diferença de pesagem entre o material úmido, como recebido para análise, e após secagem em estufa a  $103 \pm 2$  °C, até peso constante, através da Equação (3.1), apresentada por NOGUEIRA e LORA (2003).

$$H_s = (P_t - P_s)/P_t \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde:

$H_s$  = teor de umidade na base úmida (%) (kg água/kg material nas condições de trabalho)

$P_t$  = massa da amostra úmida (g), na condição de queima;

$P_s$  = massa da amostra seca (g), estado da biomassa seca em estufa a 105°C, até peso constante.

O poder calorífico superior e poder calorífico inferior na base úmida (poder calorífico líquido) foram determinados em bomba calorimétrica Marca IKA, Modelo 2000, utilizando-se a Norma DIN 51900 (*Determining the gross calorific value of solid and liquid fuels using the bomb calorimeter, and calculation of net calorific value*). O poder calorífico líquido foi obtido na bomba calorimétrica através do

---

<sup>33</sup> As definições das propriedades utilizadas para avaliar a qualidade da biomassa frente à estocagem estão no Glossário.

<sup>34</sup> No caso do uso da madeira para a geração de energia, a informação relativa à umidade deve-se referir ao peso total, até mesmo porque, esta é a base mais utilizada nos cálculos do poder calorífico líquido. Além disso, esta é a base de referência normalmente encontrada na literatura, facilitando as comparações e discussões do trabalho.

fornecimento dos dados de teor de umidade na base úmida, teor de cinzas e porcentagem de hidrogênio da amostra, que foi padronizado em 6 %.

A determinação da solubilidade da madeira em água fria e quente obedeceu à norma TAPPI T 207 (*Water solubility of wood and pulp*) e solubilidade em hidróxido de sódio a Norma TAPPI 212 (*One percent sodium hydroxide solubility of wood and pulp*). A avaliação da composição química quantitativa da madeira foi incluída neste trabalho, pois a quantidade de extrativos obtidos nas diferentes épocas e períodos de estocagem pode indicar as alterações químicas ocorridas na biomassa em função da estocagem.

O teor de cinzas foi obtido, na base seca, conforme Norma TAPPI 211 (*Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525°C*).

O tratamento dos dados e os resultados obtidos foram avaliados sem a distinção da espécie. Isso se justifica, pois como o objetivo foi a avaliação da influência da época de colheita sobre as propriedades da biomassa, foi avaliada uma espécie do grupo das Gimnospermas e uma das Angiospermas, que são utilizadas com maior frequência para a geração de energia na região de estudo.

O tratamento estatístico dos dados foi feito através da ANOVA/MANOVA, utilizando-se o teste F para verificação de variação significativa ao nível de 95 %, e confirmação da variação através do Teste de média de Tukey.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Influência da época de colheita sobre as propriedades da biomassa florestal

#### 4.1.1 Teor de umidade

Ao contrário do que HEDING (1984) e NURMI (1995) afirmaram, neste trabalho houve diferença significativa para o teor de umidade, em função da época de colheita (TABELA 2.3 – APÊNDICE II), concordando com HAKKILA<sup>35</sup>, citado por

---

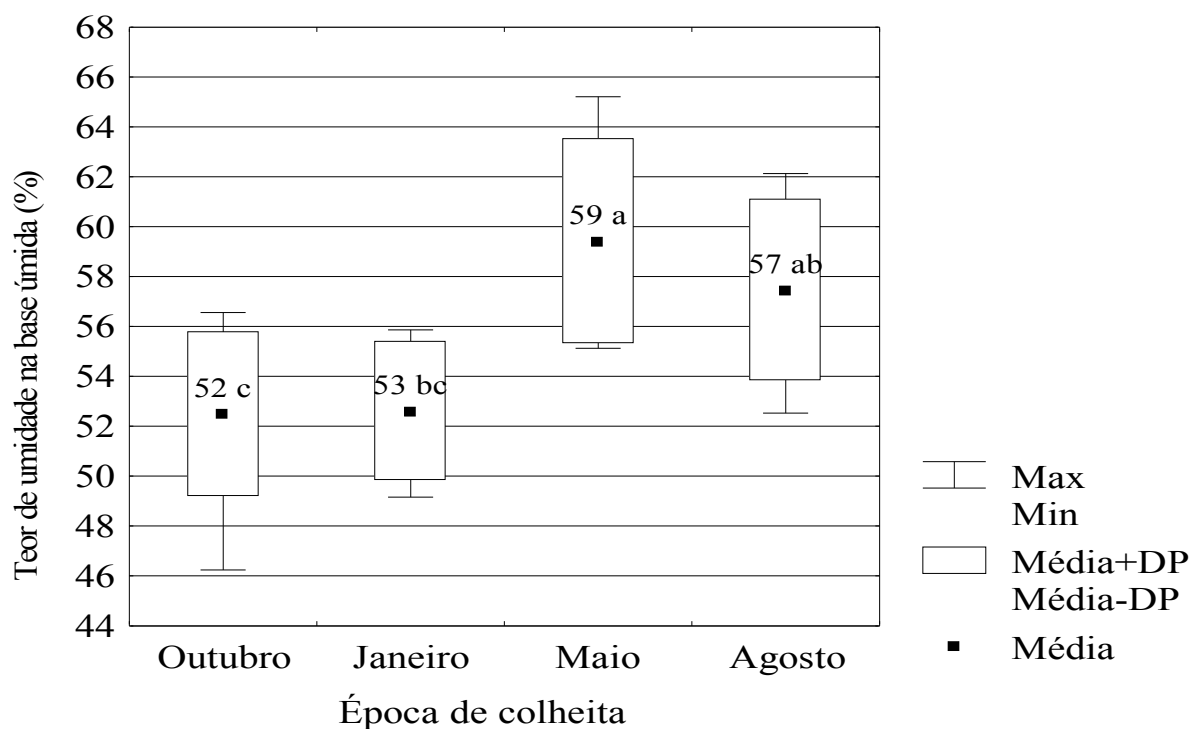
<sup>35</sup> HAKKILA, P. *Polttohakepuun kuivuminen metsässä (Forest seasoning of wood intended for fuel chips)*. 1962. n. 54. 82 p. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae.

NURMI (1995, p. 249), que afirmou que a umidade flutua com as estações do ano. GARSTANG et al (2002) concluiu que colheitas feitas no verão, incluindo toda a copa da árvore, têm maior conteúdo de umidade, contrariando também os dados obtidos aqui.

A aplicação do Teste de médias de Tukey (TABELA 2.4 – APÊNDICE II ) demonstrou que o mês de maio, onde o teor de umidade médio foi maior, e com maior variabilidade nos dados, foi somente igual a agosto, como também outubro, o mês com menor teor de umidade médio, foi igual estatisticamente à janeiro, formando dois grupos. O grupo primavera-verão, com menores teores de umidade e o grupo outono-inverno, com maiores teores de umidade, apresentando a mesma tendência observada por HEDING (1984).

No entanto, os valores de teor de umidade na base úmida tiveram maior amplitude de variação que no trabalho de HEDING (1984), variando desde 46 % na coleta feita na primavera até 65 % de teor de umidade na coleta feita no outono. A coleta feita na entrada da primavera conferiu à biomassa menor teor de umidade, apesar de no verão ser verificada a menor variação dos dados (GRÁFICO 2.3).

GRÁFICO 2.3 – TEOR DE UMIDADE NA BASE ÚMIDA DE TORAS COM CASCA DE *Pinus* E *Eucalyptus* E COSTANEIRA DE *Pinus* EM FUNÇÃO DA ÉPOCA DE COLHEITA



FONTE: O autor

NOTAS: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

A análise da época de colheita foi feita sem a distinção de espécie ou forma, sendo que os dados apresentados representam a média de todos os resultados obtidos.

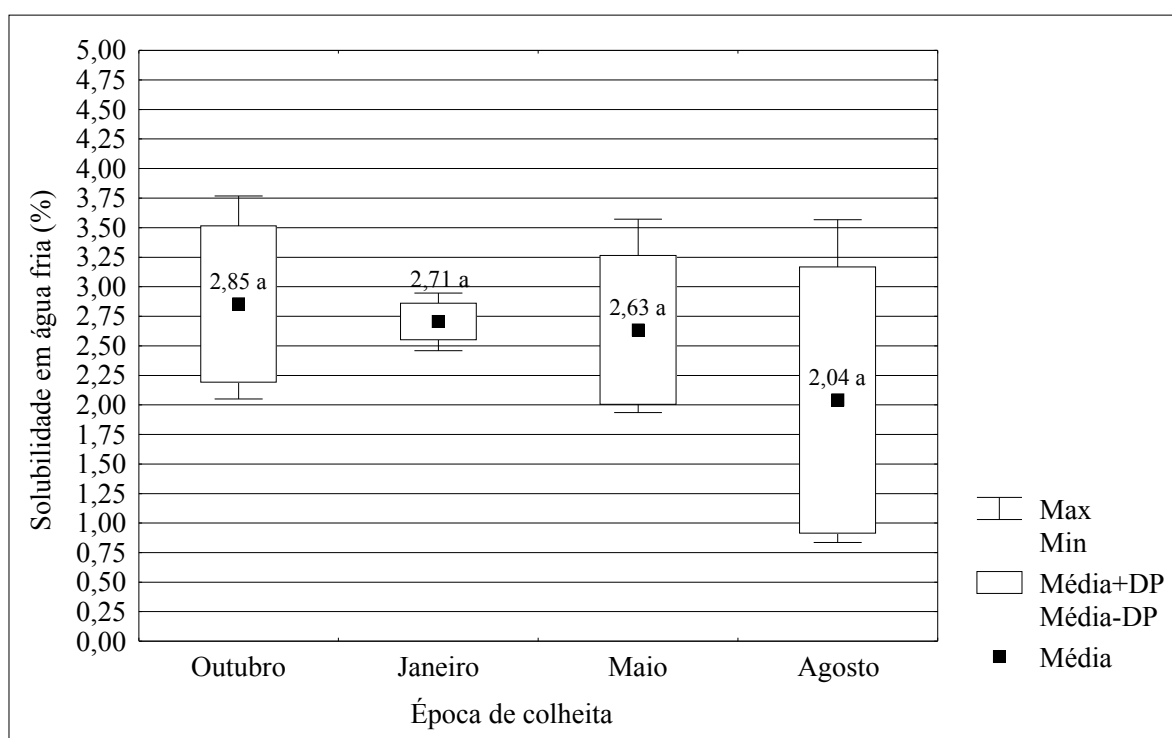
Em função da relação entre o teor de umidade e a quantidade de metabólitos presentes na biomassa, nas diferentes estações do ano (GARSTANG *et al.*, 2002), esperava-se que os teores de umidade da madeira com casca fossem maiores nas épocas onde a intensidade fisiológica é maior (primavera e verão). No entanto, os resultados obtidos foram o oposto do esperado. Avaliando-se a quantidade de metabólitos, medidos a partir da solubilidade da madeira em água fria, quente e teor de cinzas (apresentados nos próximos tópicos), pode-se perceber, que apesar de haver menos água, a quantidade destes componentes é maior nas referidas épocas.

Portanto, as melhores épocas de colheita são na primavera e verão, quando os teores de umidade são os mais baixos para a biomassa florestal.

#### 4.1.2 Composição química da madeira

A época de colheita não apresentou influência sobre a solubilidade da madeira em água fria e água quente, indicando que a composição e quantidade dos extrativos (componentes inorgânico, taninos, gomas, açúcares, compostos que dão cor à madeira e o amido) não se alteraram em função da época de colheita da madeira (TABELAS 2.5 e 2.6 e 2.7 e 2.8 – APÊNDICE II ).

GRÁFICO 2.4 – SOLUBILIDADE EM ÁGUA FRIA DE TORAS COM CASCA DE *Pinus* E *Eucalyptus* E COSTANEIAS DE *Pinus*, EM FUNÇÃO DA ÉPOCA DE COLHEITA



FONTE: O autor

NOTAS: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

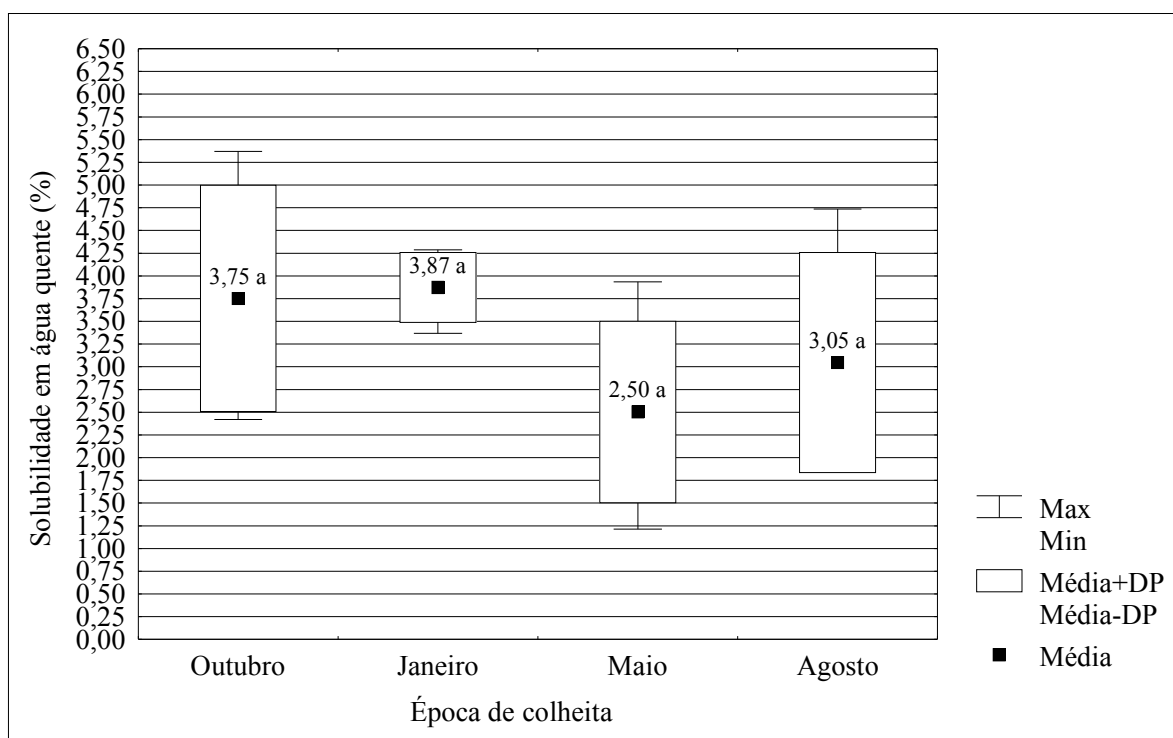
A análise da época de colheita foi feita sem a distinção de espécie ou forma, sendo que os dados apresentados representam a média de todos os resultados obtidos.

O menor valor de solubilidade em água fria (0,85 %) foi observado no mês de agosto, como também a menor média de solubilidade. Em contrapartida, o maior valor de solubilidade (3,77 %) foi observado em outubro, que também teve a maior média obtida. De forma geral, houve a tendência de haver a maior quantidade de extrativos na

primavera e verão, respectivamente e os menores no inverno e outono, respectivamente (GRÁFICO 2.4).

Para a solubilidade em água quente, o teste F indicou variação significativa, que não foi comprovada pelo teste Tukey. O valor médio obtido no mês de maio (outono) foi inferior aos demais, estando próximo da diferença significativa entre os meses de outubro e janeiro (primavera e verão) (GRÁFICO 2.5).

GRÁFICO 2.5 - SOLUBILIDADE EM ÁGUA QUENTE DE TORAS COM CASCA DE *Pinus* E *Eucalyptus* E COSTANEIRAS DE *Pinus*, EM FUNÇÃO DA ÉPOCA DE COLHEITA



FONTE: O autor

NOTAS: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

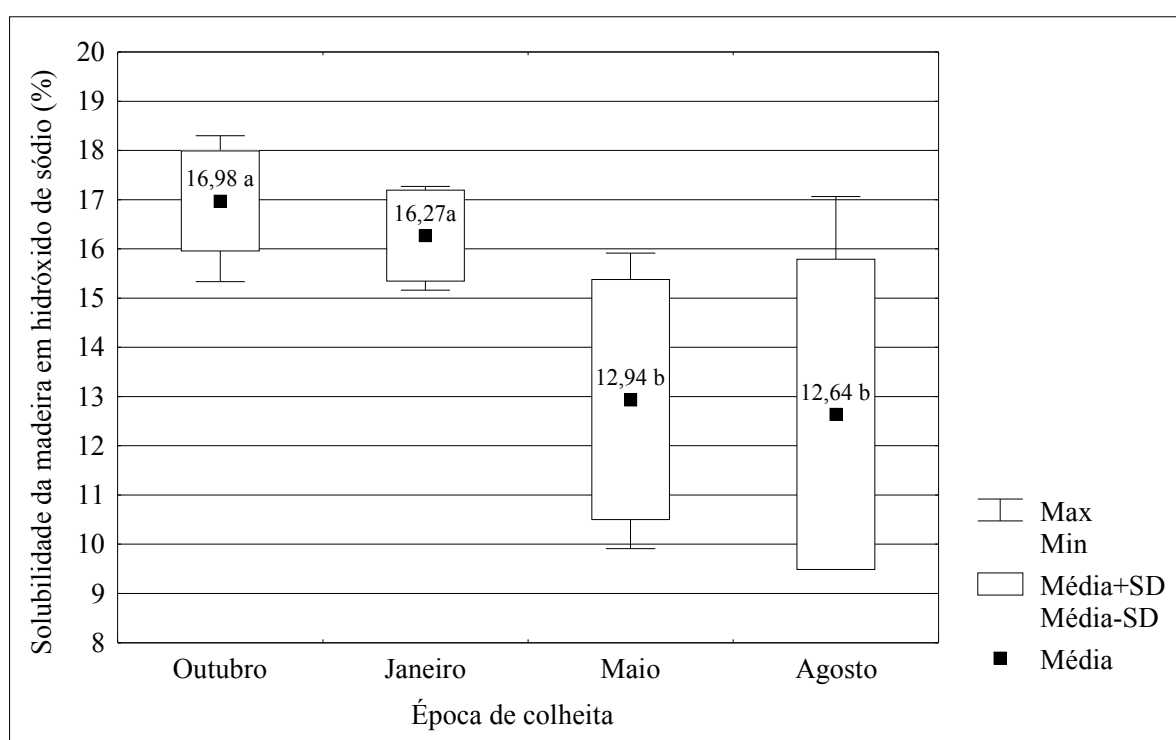
A análise da época de colheita foi feita sem a distinção de espécie ou forma, sendo que os dados apresentados representam a média de todos os resultados obtidos.

Para a solubilidade em água quente, o comportamento foi semelhante ao observado para os extrativos obtidos em água fria, sendo que o amido é o componente que é extraível em água quente e não em água fria, contribuindo para a diferença nos valores de solubilidade observados. O menor valor observado (2,00 %) foi no mês de

agosto e o maior (5,37 %) em outubro. As maiores médias foram observadas em janeiro e outubro, e as menores em maio e agosto, respectivamente (GRÁFICO 2.5).

Os valores obtidos para a solubilidade em hidróxido de sódio tiveram o mesmo comportamento da solubilidade em água fria. O menor valor (9,91 %) foi observado em outono e o maior (18,30 %) na primavera. Neste caso, a época de colheita influenciou o nível de solubilidade da madeira em hidróxido de sódio, sendo que as épocas de primavera e verão foram iguais estatisticamente e as épocas de outono e inverno também se igualaram entre si, formando dois grupos distintos (TABELA 2.9 e 2.10 – APÊNDICE II e GRÁFICO 2.6).

GRÁFICO 2.6 - SOLUBILIDADE EM HIDRÓXIDO DE SÓDIO DE TORAS COM CASCA DE *Pinus* E *Eucalyptus* E COSTANEIRA DE *Pinus*, EM FUNÇÃO DA ÉPOCA DE COLHEITA



FONTE: O autor

NOTAS: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

A análise da época de colheita foi feita sem a distinção de espécie ou forma, sendo que os dados apresentados representam a média de todos os resultados obtidos.

Além disso, mesmo não tendo havido diferença significativa, houve a tendência da quantidade dos componentes contidos no lúmen das células, extraídos com água, terem sido maiores na primavera e verão. Tanto os valores obtidos para água fria, quanto quente estão de acordo com os observados por NURMI (1992) e foram superiores aos observados por GARSTANG *et al* (2002).

Com relação aos componentes extrativos, somente a solubilidade em hidróxido de sódio demonstrou que a época de colheita tem influência sobre a composição química da madeira, concordando com GARSTANG *et al* (2002). Este autor também afirmou que colheitas feitas no verão conferem à biomassa maior quantidade de carboidratos solúveis, tendência esta que também foi observada neste trabalho, tanto para água fria, quente e hidróxido de sódio.

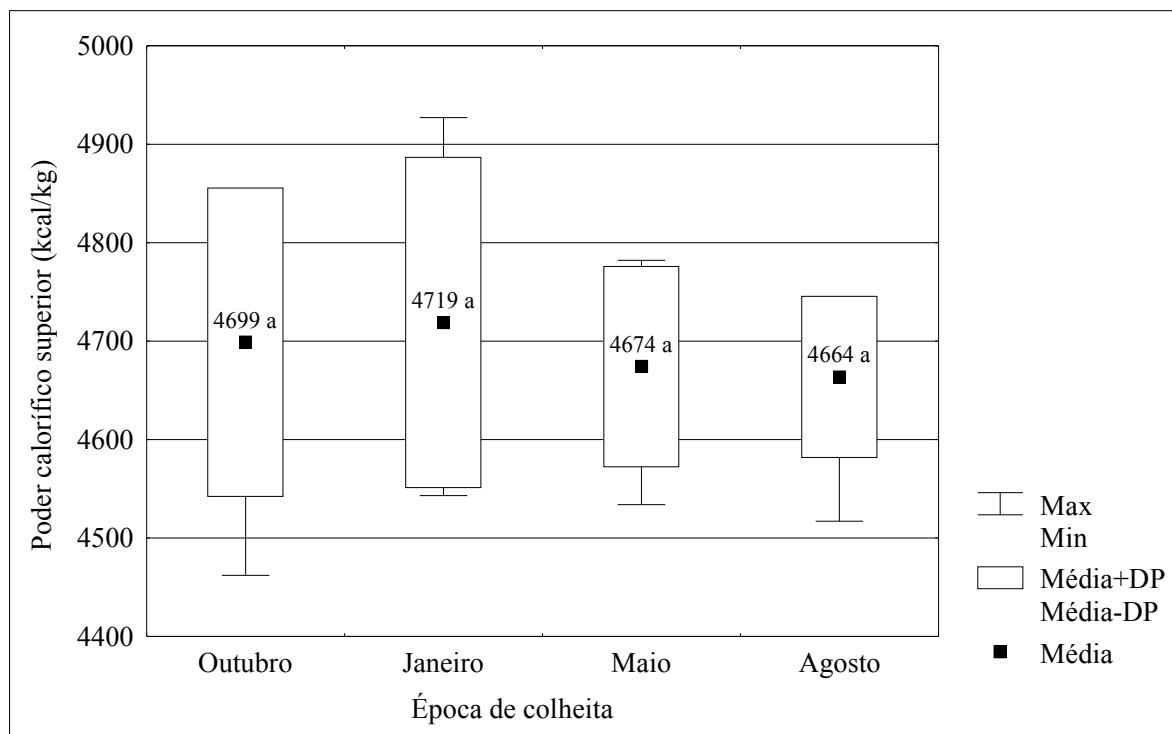
Considerando a composição química da madeira, as melhores épocas de colheita são a primavera e o verão. Nestas épocas a maior quantidade de componentes extrativos, contribui para o aumento do poder calorífico, que por sua vez é o indicador direto da qualidade energética da madeira.

#### 4.1.3 Poder calorífico

Com relação ao poder calorífico superior, as análises estatísticas não apontaram variação em função da época de colheita (TABELA 2.11 e 2.12 – APÊNDICE II), confirmando que a época de colheita não afeta o poder calorífico superior da biomassa florestal. Os valores encontrados no presente trabalho variaram desde 4462 kcal/kg na coleta feita na primavera até 4927 kcal/kg na coleta feita no verão (GRÁFICO 2.7), estando dentro dos valores observados por THÖRNQVIST e GUSTAFSSON, citados por THÖRNQVIST (1985), THÖRNQVIST (1986), NURMI (1990, 1995) e QUIRINO *et al* (2004).



GRÁFICO 2.7 – PODER CALORÍFICO SUPERIOR DE TORAS COM CASCA DE *Pinus* E *Eucalyptus* E COSTANEIRA DE *Pinus* EM FUNÇÃO DA ÉPOCA DE COLHEITA



FONTE: O autor

NOTAS: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

A análise da época de colheita foi feita sem a distinção de espécie ou forma, sendo que os dados apresentados representam a média de todos os resultados obtidos.

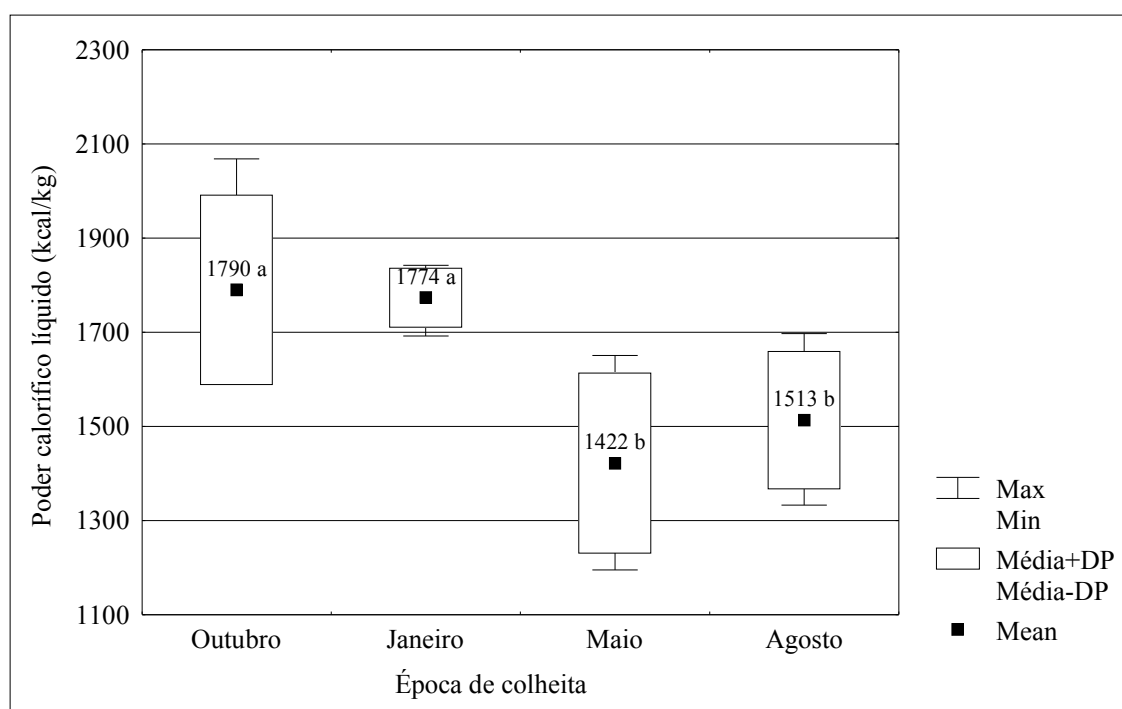
O poder calorífico superior apresentou a tendência inversa ao teor de umidade, e direta aos teores de extrativos em água fria, quente e hidróxido de sódio. Assim, nas épocas de primavera e verão, os teores de umidade foram menores, a quantidade de extrativos e o poder calorífico superior foram maiores, demonstrando melhor qualidade da biomassa para geração de energia nestas épocas. Isso porque, a maior quantidade de açúcares, resinas, óleos, graxas, que caracterizam os extrativos, contribuem para o aumento do poder calorífico.

No entanto, para o poder calorífico líquido, que tem estreita relação com o teor de umidade da biomassa, houve variação significativa entre as épocas de colheita. Em função deste aspecto, o comportamento do teor de umidade e poder calorífico líquido foram iguais, sendo outubro e janeiro estatisticamente iguais, com maior poder

calorífico líquido, como também maio e agosto, com menor poder calorífico líquido (TABELAS 2.13 e 2.14 – APÊNDICE II).

Os valores extremos obtidos variaram de 1195 kcal/kg (65 % de teor de umidade) na coleta feita no outono a 2068 kcal/kg (46 % de teor de umidade) na coleta feita na primavera, para teores de umidade entre 46 a 65 % de umidade (GRÁFICO 2.8).

GRÁFICO 2.8 – PODER CALORÍFICO LÍQUIDO DE TORAS COM CASCA DE *Pinus* E *Eucalyptus* E COSTANEIRA DE *Pinus* EM FUNÇÃO DA ÉPOCA DE COLHEITA



FONTE: O autor

NOTAS: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

A análise da época de colheita foi feita sem a distinção de espécie ou forma, sendo que os dados apresentados representam a média de todos os resultados obtidos.

Estes valores estão de acordo com os valores obtidos por BRITO e BARRICHELO (1982), BRITO (1986), que obtiveram valores de 2200 a 2500 kcal/kg, para 40 % de umidade. NOGUEIRA e LORA (2003) e TEIXEIRA e LORA (2004) mencionaram o valor de 1361 kcal/kg para um teor de umidade de 62 %. LEHTOVAARA (2004) obteve poder calorífico líquido de 1910 a 2508 kcal/kg para

material com 45 % de umidade, e 1194 a 1672 kcal/kg para material com 60 % de umidade.

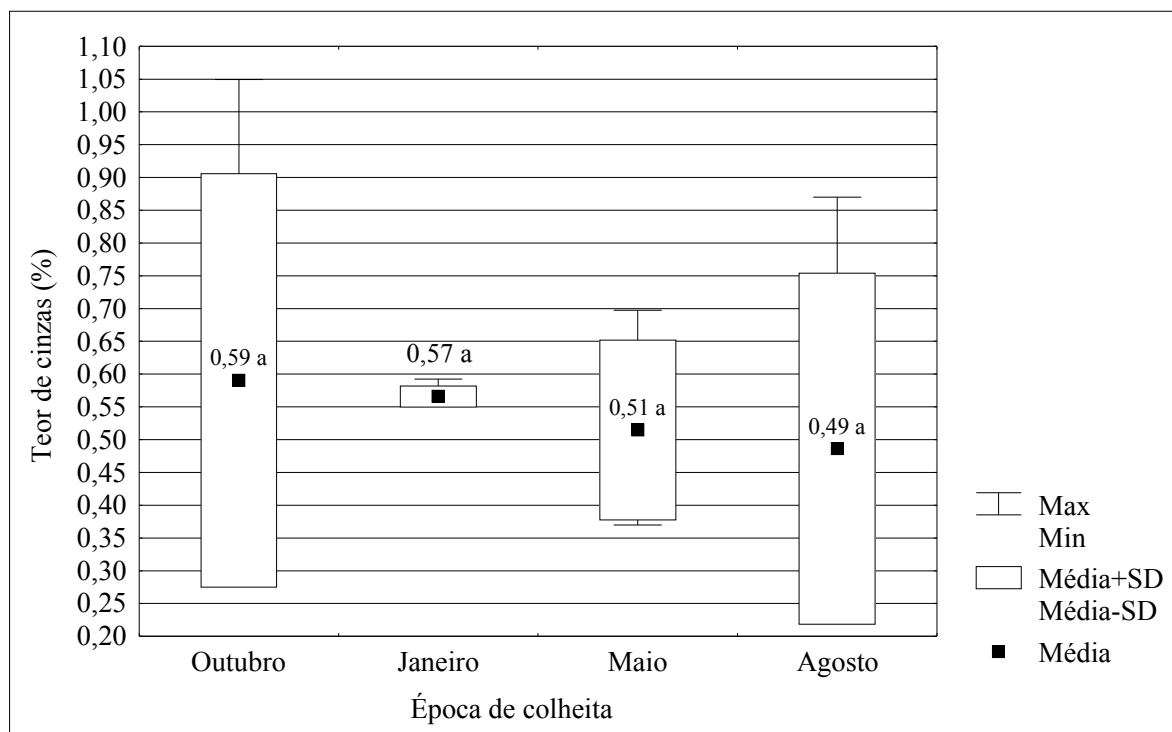
Considerando o poder calorífico líquido, as melhores épocas de colheita são a primavera e o verão, coincidindo com o observado por pesquisadores na Europa. Isso porque, nestas épocas o teor de umidade menor e os maiores valores de poder calorífico superior resultam em maiores ganhos energéticos, pelo aumento do poder calorífico líquido.

#### 4.1.4 Teor de cinzas

O teor de cinzas não apresentou variação em relação à época de colheita (TABELAS 2.15 e 2.16 – APÊNDICE II). Porém, a exemplo do que ocorreu com os metabólitos presentes na madeira, o menor teor de cinzas observado, (0,26 %) foi em agosto e o maior (0,59 %) em outubro, tendo-se a tendência dos valores médios observados serem maiores na primavera e verão e os menores no inverno de outono, respectivamente (GRÁFICO 2.9). Estes resultados são confirmados pelos maiores valores de solubilidade da madeira em água fria e quente, nestas épocas, indicando a maior quantidade de sais e minerais no lúmen das células.

Os valores obtidos para *Pinus* e *Eucalyptus* avaliados de forma conjunta neste trabalho foram inferiores aos obtidos por JIRJIS (2005) e THÖRNQVIST (1986), que trabalharam somente com espécies de folhosas, e mais próximos dos obtidos por BRITO e BARRICHELO (1982) que mencionou valores para espécies de *Eucalyptus*.

GRÁFICO 2.9 – TEOR DE CINZAS DE TORAS COM CASCA DE *Pinus* E *Eucalyptus* E COSTANEIRA DE *Pinus* EM FUNÇÃO DA ÉPOCA DE COLHEITA



FONTE: O autor

NOTAS: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ). (Tukey  $P > 0,05$ ).

A análise da época de colheita foi feita sem a distinção de espécie ou forma, sendo que os dados apresentados representam a média de todos os resultados obtidos.

#### 4.2 Influência da época de estocagem sobre as propriedades da biomassa florestal

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos a partir da comparação entre as médias, em todos os períodos de estocagem analisados (recém-coletado, com dois, quatro e seis meses de estocagem) e sem distinção entre as espécies e forma e tamanho, entre os lotes avaliados.

#### 4.2.1 Teor de umidade

A época de estocagem teve influência sobre o comportamento da biomassa, em relação ao teor de umidade. Assim, houve diferença significativa entre as épocas de estocagem avaliadas (TABELAS 2.17 e 2.18 – APÊNDICE II).

Os teores de umidade variaram desde valores mínimos de 12% na biomassa estocada entre agosto a fevereiro até valores máximos de 65% na biomassa estocada entre maio a novembro (TABELA 2.19).

TABELA 2.19 – TEOR DE UMIDADE NA BASE ÚMIDA DE TORAS DE *Pinus* E *Eucalyptus* E COSTANEIRA DE *Pinus* EM FUNÇÃO DA ÉPOCA DE ESTOCAGEM

TEOR DE UMIDADE NA BASE ÚMIDA (%)	ÉPOCA DE ESTOCAGEM			
	Outubro a maio	Janeiro a agosto	Maio a novembro	Agosto a fevereiro
Média	39bc	48ac	48a	38c
Mínimo	14	37	17	12
Máximo	63	57	65	62
Desvio padrão	15,11	7,36	13,94	16,52

FONTE: O autor

Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

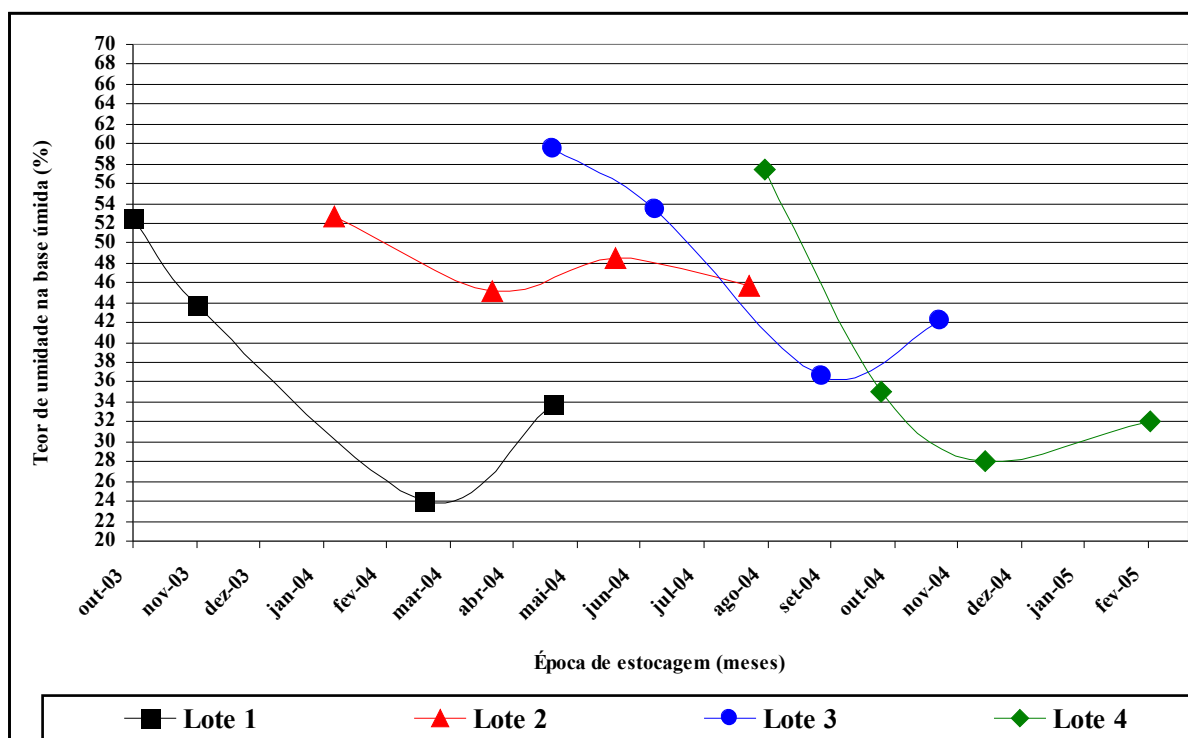
Os valores médios mais altos de umidade foram observados nos lotes onde o material foi coletado no verão (janeiro) e permaneceu estocado durante o outono e inverno (lote 2), e quando o material foi coletado no outono (maio) e permaneceu estocado até o final da primavera (lote 3) (GRÁFICO 2.10).

O melhor comportamento na estocagem foi dos lotes onde o material foi coletado na primavera ou saída do inverno e estocado no verão. Nos lotes 1 e 4 ocorreram as maiores variações e perdas de teor de umidade (GRÁFICO 2.10), concordando com os resultados obtidos por HEDING (1984).

A secagem mais rápida no verão, seguida de re-umidificação no outono e inverno, observada por HEDING (1984), THÖRNQVIST (1984b), NURMI (1995); e JIRJIS (1995) pôde ser constatada também no material que permaneceu sob estocagem entre os meses de outubro a maio (lote 1). Enquanto que o material coletado em agosto e que permaneceu sob estocagem até fevereiro (lote 4) teve o mesmo comportamento

que o observado por THÖRNQVIST (1984b), ocorrendo decréscimo do teor de umidade durante o verão.

GRÁFICO 2.10 – VARIAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE NA BASE ÚMIDA MÉDIO DE CADA LOTE EM RELAÇÃO À ÉPOCA DE ESTOCAGEM DA BIOMASSA FLORESTAL.



FONTE: O autor

Portanto, tanto nos estudos realizados na Europa<sup>36</sup>, como no Brasil, as diferenças de clima, relacionadas às épocas do ano, influenciaram na perda e ganho de umidade no material sob estocagem, de modo que as maiores perdas de umidade ocorreram nos meses de verão e as menores no inverno. Além disso, mesmo tendo havido perda de umidade nos meses mais favoráveis, se o material permaneceu sob estocagem, o mesmo voltou e absorver umidade nos meses menos favoráveis.

O fato de terem sido utilizadas pilhas pequenas (10 m<sup>3</sup>) também contribuiu para a melhor representação do efeito da época de estocagem sobre a variação de teor de umidade, como também observaram THÖRNQVIST (1985) e JIRJIS (1995).

<sup>36</sup> HEDING (1984), NURMI (1995) e THÖRNQVIST (1984b).

A época de estocagem de agosto a fevereiro se iguala somente à época de outubro a maio, correspondendo às épocas de primavera e verão, como também são iguais as épocas de janeiro a agosto e maio a novembro, correspondendo à saída do verão, outono e inverno. Assim, houve a tendência de se configurar dois grupos de comportamento relativo às épocas do ano, verão e primavera e outono e inverno. Assim, o material coletado e estocado durante os meses de inverno apresentou maior teor de umidade, durante todo o período de estocagem, em comparação com o material coletado e estocado nos meses de verão, confirmando as afirmações feitas por HEDING (1984); THÖRNQVIST (1984b); NURMI (1995) e JIRJIS (1995).

Deve-se ressaltar ainda que esta condição foi obtida em clima temperado, onde as condições de inverno e verão são bem definidas em relação à variação de temperatura e umidade relativa. No inverno são observadas temperaturas médias inferiores a 15 °C e umidade relativa do ar superior a 80%, enquanto no verão a temperatura média é em torno de 20 °C e a umidade relativa apresenta valores em torno de 75%, em condições típicas de clima.

#### *4.2.2 Composição química da madeira*

Tanto para a solubilidade da madeira em água fria e quente, como para a solubilidade em hidróxido de sódio houve variação significativa em relação à época de estocagem (TABELAS 2.20, 2.21, 2.23, 2.24, 2.26 e 2.27 – APÊNDICE II ).

Para água fria, o menor valor observado (0,36 %) foi no material estocado entre maio e novembro e o maior (6,03 %), entre outubro e maio (TABELA 2.22).

Avaliando-se a solubilidade em água fria pode-se perceber que as menores variações nos extrativos ocorreram nos lotes 2 e 4, coletados no verão e inverno e estocados no outono/inverno e primavera/verão, respectivamente. Os lotes com maior variação foram os lotes 3 e 1, coletados no outono e primavera e estocados no inverno/primavera e verão/outono, respectivamente (GRÁFICO 2.11).

TABELA 2.22 – SOLUBILIDADE EM ÁGUA FRIA DE TORAS COM CASCA DE *Pinus* E *Eucalyptus* E COSTANEIRA DE *Pinus* EM FUNÇÃO DA ÉPOCA DE ESTOCAGEM

SOLUBILIDADE EM ÁGUA FRIA (%)	ÉPOCA DE ESTOCAGEM			
	Outubro a maio	Janeiro a Agosto	Maio a novembro	Agosto a Fevereiro
Média	2,60ab	2,70ab	2,75a	1,98b
Mínimo	0,43	0,52	0,36	0,67
Máximo	6,03	3,57	6,01	3,57
Desvio padrão	1,39	0,90	1,28	0,98

FONTE:O autor

Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

Para água quente, os valores extremos variaram de 0,64 %, em material estocado entre janeiro a agosto até 7,46 %, no material estocado entre outubro a maio (TABELA 2.25).

Avaliando-se a solubilidade em água quente pode-se perceber que as menores variações nos extrativos ocorreram nos lotes 4 e 2, coletados no inverno e verão e estocados na primavera/verão e outono/inverno, respectivamente. Os lotes com maior variação foram os lotes 3 e 1, coletados outono e primavera e estocados no inverno/primavera e verão/outono, respectivamente (GRÁFICO 2.12).

TABELA 2.25 – SOLUBILIDADE EM ÁGUA QUENTE DE TORAS COM CASCA DE *Pinus* E *Eucalyptus* E COSTANEIRA DE *Pinus* EM FUNÇÃO DA ÉPOCA DE ESTOCAGEM

SOLUBILIDADE EM ÁGUA QUENTE (%)	ÉPOCA DE ESTOCAGEM			
	Outubro a maio	Janeiro a agosto	Maio a novembro	Agosto a Fevereiro
Média	4,09a	3,36ab	3,13b	2,94b
Mínimo	1,74	0,64	0,96	1,08
Máximo	7,46	4,74	6,21	5,78
Desvio padrão	1,48	1,19	1,40	1,37

FONTE:O autor

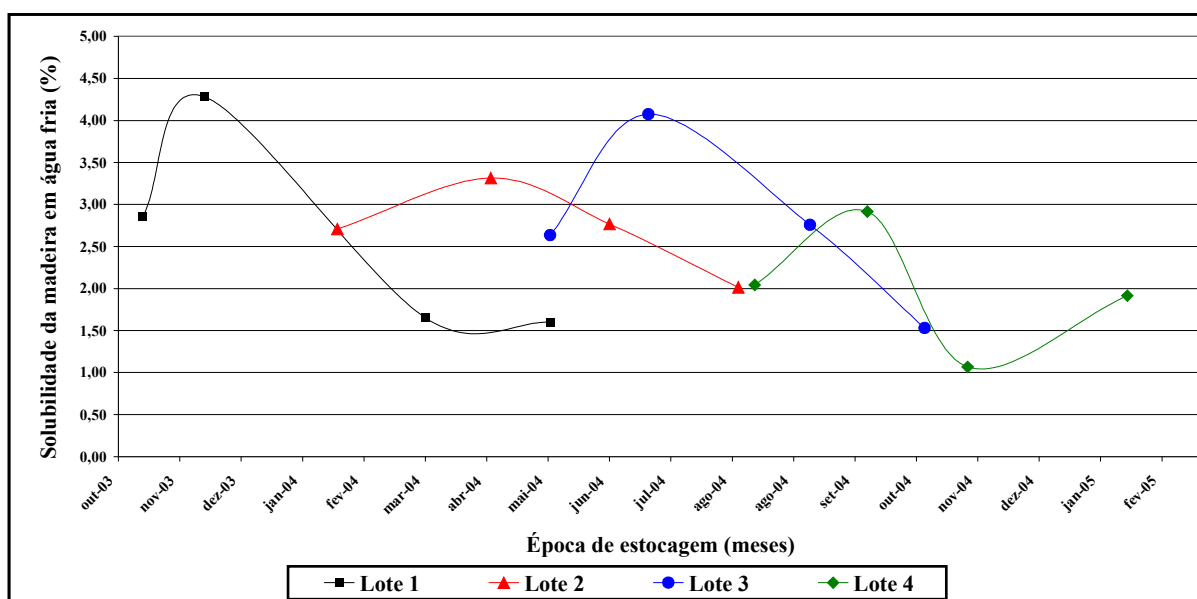
Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

Os GRÁFICOS 2.11 e 2.12 demonstram que os extrativos sofrem processos de transformação e disponibilização nos dois primeiros meses de estocagem, ocorrendo desta forma alterações na composição química dos compostos, caracterizado pelo aumento da solubilidade. Porém, estes permanecem na biomassa, não sofrendo perda considerável. No entanto, estendendo-se o tempo de estocagem, não somente a



transformação e disponibilização continuam a ocorrer, como também passa a aumentar a perda destes componentes para o meio, fazendo com que a porcentagem de solubilidade diminua.

GRÁFICO 2.11 - COMPORTAMENTO DA SOLUBILIDADE DA MADEIRA EM ÁGUA FRIA DE CADA LOTE EM RELAÇÃO À ÉPOCA DE ESTOCAGEM DO MATERIAL



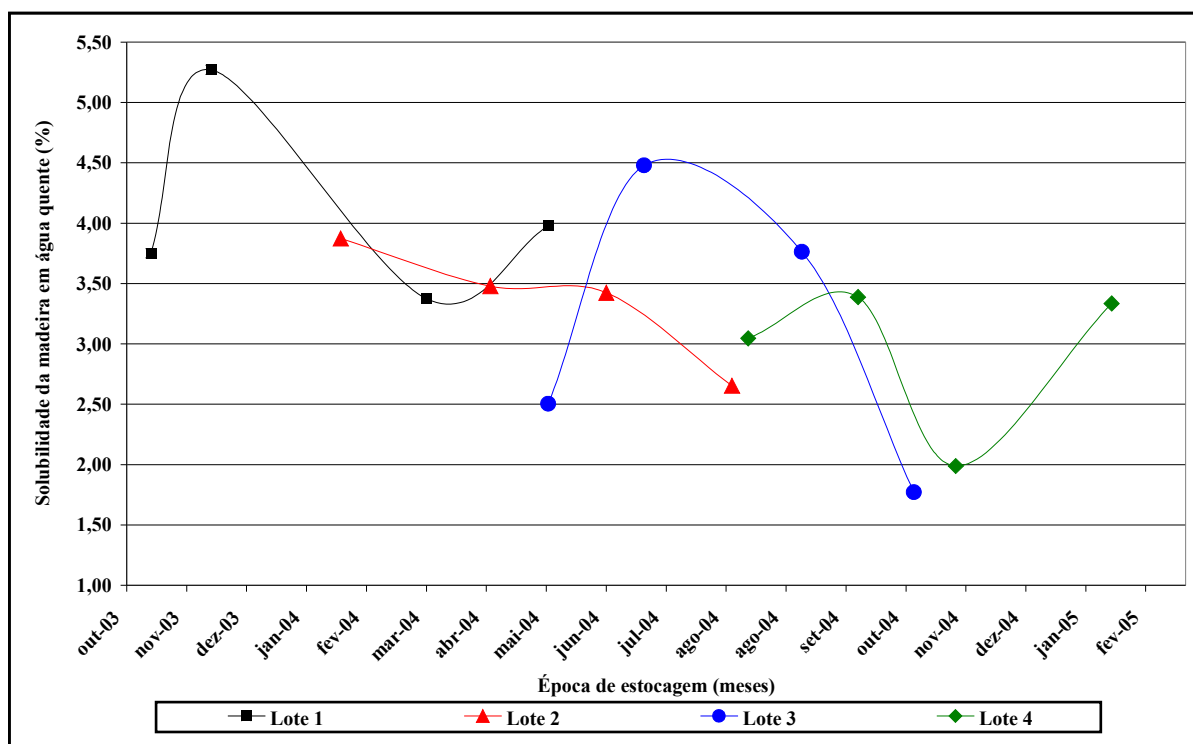
FONTE: O autor

No lote 4, onde o período de estocagem de 6 meses coincide com a época de verão, ocorre o aumento da porcentagem de solubilidade em água fria, quente e hidróxido de sódio, no final do período. Neste caso, o aumento da solubilidade, principalmente em hidróxido de sódio, em relação aos valores iniciais, pode indicar o início do processo de degradação e alteração da estrutura da parede celular, apesar desta hipótese somente poder ser comprovada com a realização de ensaios que caracterizem a variação dos componentes macromoleculares da madeira (celulose e lignina) e de análise de biodegradação.

O nível de alteração química também é diferente em relação à posição da tora, sendo que os topos das peças iniciarão o processo de alterações químicas de forma mais acelerada em relação à região central. Isto porque os topos da tora estão mais sujeitas as variações de umidade e temperatura e maior troca de ar, propiciando o

carregamento das substâncias, que após transformação são disponibilizadas e sujeitas a volatilização.

GRÁFICO 2.12 - COMPORTAMENTO DA SOLUBILIDADE DA MADEIRA EM ÁGUA QUENTE DE CADA LOTE EM RELAÇÃO À ÉPOCA DE ESTOCAGEM DO MATERIAL



FONTE:O autor

Para a solubilidade em hidróxido de sódio, os valores extremos variaram de 7,73 %, em material estocado entre maio a novembro até 18,87 %, no material estocado entre outubro a maio (TABELA 2.28).

Avaliando-se a solubilidade em hidróxido de sódio pode-se perceber que as maiores variações nos extrativos ocorreram nos lotes 2 e 4, coletados no verão e inverno e estocados no outono/inverno e primavera/verão, respectivamente. Os lotes com menor variação foram os lotes 3 e 1, coletados no outono e primavera e estocados no inverno/primavera e verão/outono, respectivamente (GRÁFICO 2.13).

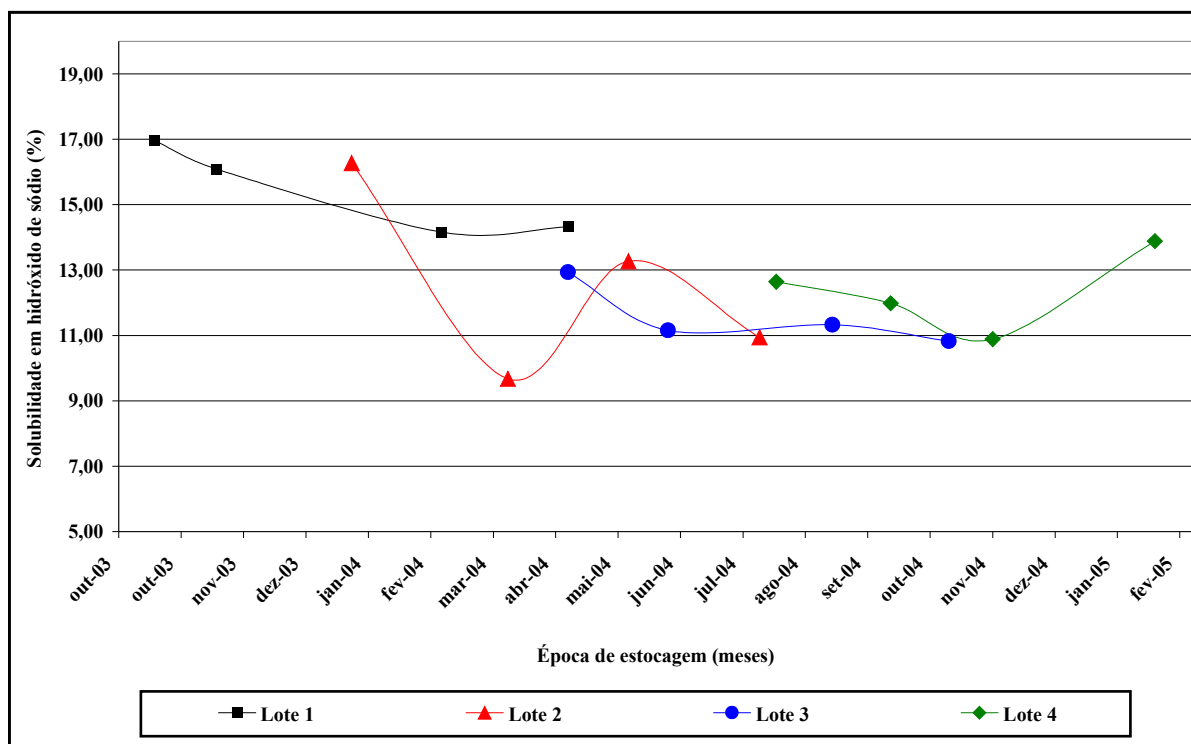
TABELA 2.28 – COMPORTAMENTO DA SOLUBILIDADE DA MADEIRA EM HIDRÓXIDO DE SÓDIO DE CADA LOTE EM RELAÇÃO À ÉPOCA DE ESTOCAGEM DO MATERIAL

SOLUBILIDADE EM HIDRÓXIDO DE SÓDIO (%)	ÉPOCA DE ESTOCAGEM			
	Outubro a maio	Janeiro a agosto	Maio a novembro	Agosto a Fevereiro
Média	15,39a	12,54b	11,56b	12,35b
Mínimo	12,10	9,09	7,73	8,87
Máximo	18,87	17,27	15,91	17,06
Desvio padrão	2,00	2,62	2,07	2,63

FONTE: O autor

Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

GRÁFICO 2.13 - SOLUBILIDADE EM HIDRÓXIDO DE SÓDIO DE TORAS DE *Pinus* E *Eucalyptus* E COSTANEIRA DE *Pinus* EM FUNÇÃO DA ÉPOCA DE ESTOCAGEM



FONTE: O autor

O grau de solubilidade da madeira em hidróxido de sódio aquecido indica o grau de degradação por fungos, calor, luz, oxidação, entre outros, sendo que na madeira degradada, a porcentagem de materiais solúveis em álcali aumenta TAPPI (1994c). Assim, os resultados obtidos indicam que a biomassa, nos quatro lotes avaliados, não foi degradada de forma representativa durante os seis meses de

estocagem. Isto porque os valores obtidos decresceram ao longo do tempo de estocagem, aumentando somente no lote 4, no final do período de estocagem. Isso coincide com os meses de verão no final da estocagem, onde as condições para a degradação são mais favoráveis.

#### 4.2.3 Poder calorífico

Com relação ao poder calorífico superior, não houve diferença significativa em função da época de estocagem (TABELA 2.29 e 2.30 – APÊNDICE II).

Os valores variaram entre o mínimo de 4462 kcal/kg observado em material coletado entre outubro e maio até o máximo de 4927 kcal/kg no material coletado no período de janeiro a agosto. Além disso, apesar de não haver diferença significativa, houve a tendência de que a melhor época de estocagem em função do poder calorífico superior foi entre agosto a fevereiro, seguido de outubro a maio, quando avaliados de forma conjunta o teor de umidade e o poder calorífico superior (TABELA 2.31)

TABELA 2.31 – PODER CALORÍFICO SUPERIOR DE TORAS DE *Pinus* E *Eucalyptus* E COSTANEIRA DE *Pinus* EM FUNÇÃO DA ÉPOCA DE ESTOCAGEM

PODER CALORÍFICO SUPERIOR (kcal/kg)	ÉPOCA DE ESTOCAGEM			
	Outubro a maio	Janeiro a agosto	Maio a novembro	Agosto a Fevereiro
Média	4709a	4688a	4736a	4735a
Mínimo	4462	4521	4534	4517
Máximo	4876	4927	4887	4911
Desvio padrão	127,90	122,62	104,59	109,49

FONTE:O autor

Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

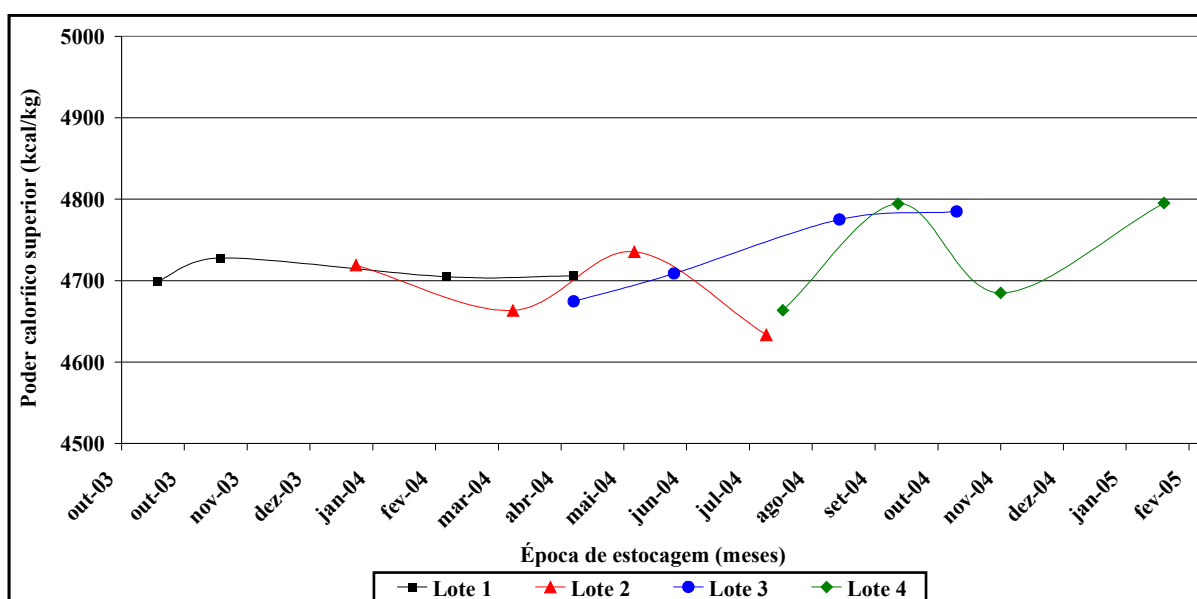
No GRÁFICO 2.14 pode-se observar que o lote 3 (maio a novembro) apresentou ganho energético, tendo o mesmo comportamento descrito por THÖRNQVIST (1984a). Este autor afirmou que a biomassa que foi produzida e coletada durante o inverno teve aumento do seu conteúdo energético. Até certo ponto, este aumento é devido a secagem do material, ao mesmo tempo em que a perda de massa é pequena.

Porém, no lote 4, o conteúdo energético se alterou, contrariando THÖRNQVIST, (1984a). A afirmação do autor foi de que se a biomassa é produzida no inverno e permanece na área de colheita até o verão, antes da coleta e transformação em partículas, então o conteúdo de energia não é alterado. Porém, deve-se ressaltar aqui, que as condições mencionadas pelo autor se referem aos locais onde ocorre neve durante o inverno, realidade que não se aplica ao estudo aqui desenvolvido.

A menor alteração no poder calorífico foi observada no lote 1, colhido na primavera e que permaneceu sob estocagem durante o verão.

Desta forma, para o poder calorífico superior, a flutuação ocorrida em função da época de estocagem é muito pequena, não ultrapassando a 200 kcal/kg, não sendo significativa para efeitos práticos do uso da biomassa.

GRÁFICO 2.14 – COMPORTAMENTO DOS VALORES MÉDIOS DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR DE CADA LOTE EM RELAÇÃO À ÉPOCA DE ESTOCAGEM DO MATERIAL



FONTE: O autor

Já o poder calorífico líquido variou em função da época de estocagem, como esperado, em função da sua relação estreita com o teor de umidade (TABELA 2.32 – APÊNDICE II). Os lotes 2 (janeiro a agosto) e 3 (maio a novembro) não diferem estatisticamente, como também os lotes 1 (outubro a maio) e 4 (agosto a fevereiro) são

iguais, sendo que os dois grupos diferem entre si (TABELA 2.33 – APÊNDICE II e TABELA 2.34).

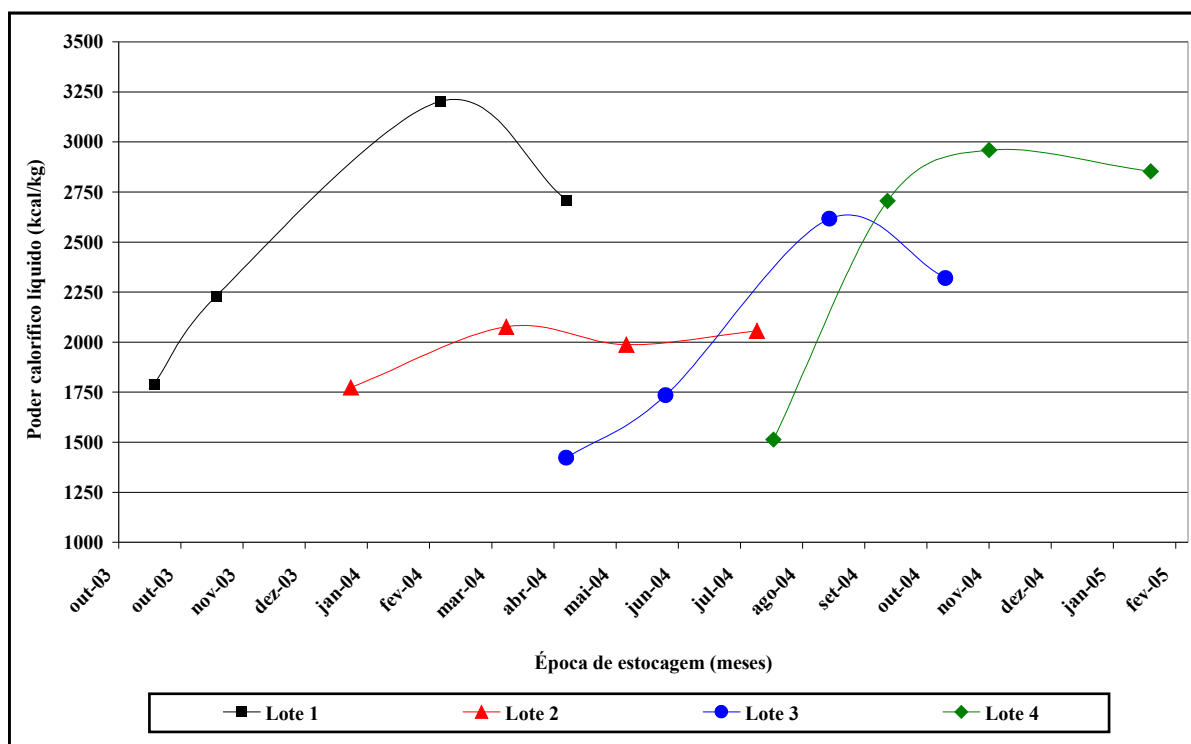
TABELA 2.34 - PODER CALORÍFICO LÍQUIDO DE TORAS DE *Pinus* E *Eucalyptus* E COSTANEIRA DE *Pinus* EM FUNÇÃO DA ÉPOCA DE ESTOCAGEM

PODER CALORÍFICO LÍQUIDO (kcal/kg)	ÉPOCA DE ESTOCAGEM			
	Outubro a maio	Janeiro a agosto	Maio a novembro	Agosto a Fevereiro
Média	2483a	1974b	2023b	2508a
Mínimo	1348	1649	1195	1333
Máximo	3733	2400	3638	3798
Desvio padrão	767,47	299,99	706,91	822,57

FONTE: O autor

NOTA: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

GRÁFICO 2.15 – COMPORTAMENTO DOS VALORES MÉDIOS DO PODER CALORÍFICO LÍQUIDO DE CADA LOTE EM RELAÇÃO À ÉPOCA DE ESTOCAGEM DO MATERIAL



FONTE: O autor

O poder calorífico líquido variou desde o valor mínimo de 1195 kcal/kg em material coletado entre maio e novembro a 3798 kcal/kg em material coletado entre

agosto e fevereiro. Para esta variável, a melhor época de estocagem foi entre agosto a fevereiro, seguido de outubro a maio.

Se a biomassa for colhida em agosto, em apenas dois meses o material terá um ganho energético de mais de 70% em relação aos valores iniciais, em termos de energia líquida para o sistema, proporcionando, portanto, maior ganho energético em menor tempo de estocagem.

No Brasil, a maior demanda por energia é nos meses de verão, coincidindo com a época em que a biomassa estocada teve com as melhores condições energéticas, proporcionando maior rendimento nas plantas de geração de energia. Esta característica é o oposto do que ocorre nos países do Hemisfério Norte.

Portanto, se o material for coletado em agosto e permanecer sob estocagem até outubro ou até dezembro, o material terá melhor qualidade energética na época do ano em que a demanda energética é maior, proporcionando maior eficiência e rendimento na planta de geração de energia.

No entanto, esta estratégia terá um potencial competitivo somente quando for possível o planejamento das questões logísticas, utilizando-se a estocagem como ferramenta para a melhoria da qualidade da biomassa para a geração de energia, considerando-se que a planta de geração tenha matéria-prima em abundância e espaço físico para a realização da operação de estocagem. Nas demais épocas do ano, a coleta e a estocagem da biomassa continuarão a ser realizadas, não tendo-se no entanto, tanto ganho energético.

#### *4.2.4 Teor de cinzas*

A época de estocagem não teve influência sobre a variação do teor de cinzas (TABELAS 2.35 e 2.36).

O teor de cinzas variou desde 0,26 % entre agosto a fevereiro até 0,59 % entre outubro a maio, sendo que o maior valor médio foi observado na época de outubro a maio e o menor foi observado entre agosto e fevereiro (TABELA 2.37).

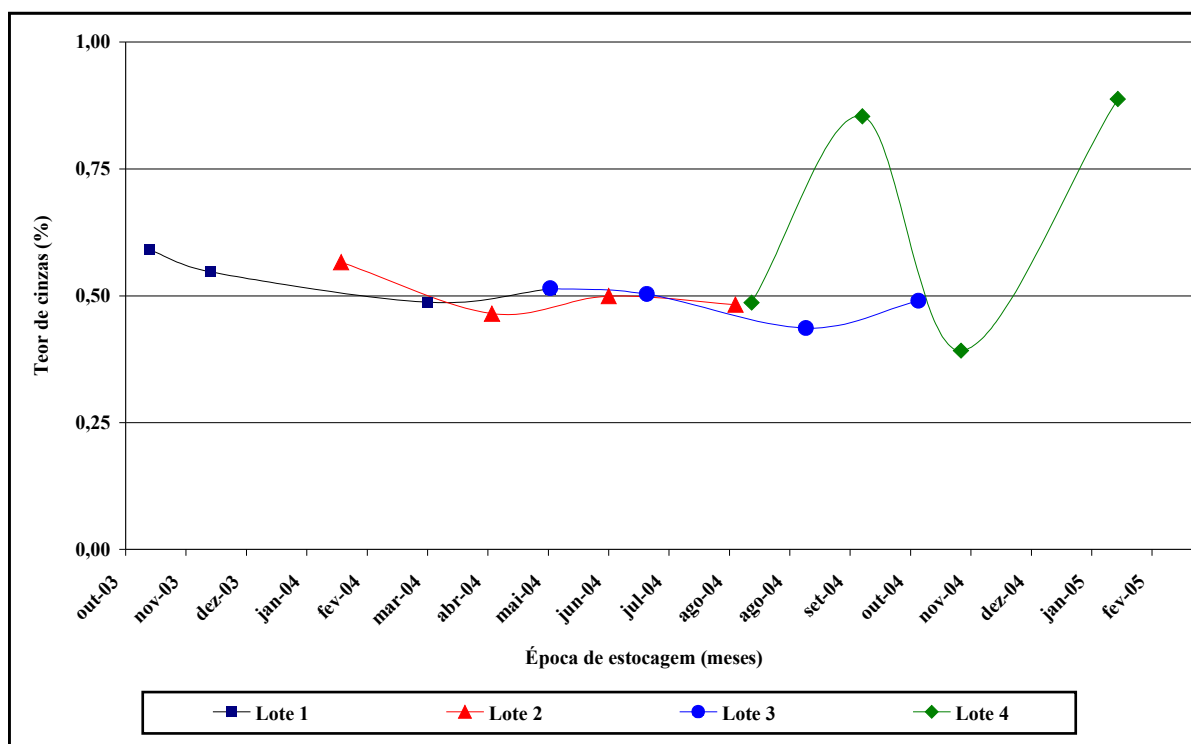
TABELA 2.37 – TEOR DE CINZAS DA MADEIRA DE TORAS DE *Pinus* E *Eucalyptus* E COSTANEIRA DE *Pinus* EM FUNÇÃO DA ÉPOCA DE ESTOCAGEM

TEOR DE CINZAS (%)	ÉPOCA DE ESTOCAGEM			
	Outubro a maio	Janeiro a agosto	Maio a novembro	Agosto a Fevereiro
Média	0,53a	0,50a	0,49a	0,65a
Mínimo	0,34	0,38	0,23	0,26
Máximo	1,05	0,60	0,83	1,98
Desvio padrão	0,22	0,07	0,20	0,57

FONTE: O autor

NOTA: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

GRÁFICO 2.16 – COMPORTAMENTO DO TEOR DE CINZAS DE CADA LOTE EM RELAÇÃO À ÉPOCA DE ESTOCAGEM DO MATERIAL



FONTE: O autor

No lote 4 foi observada a maior variação no teor de cinzas durante o tempo de estocagem, apesar do valor médio não ter sido consideravelmente alterado (GRÁFICO 2.16).



## 5 CONCLUSÕES

### 5.1 Quanto à época de colheita

- a) A época de colheita teve influência sobre o teor de umidade, solubilidade em hidróxido de sódio e poder calorífico líquido, não tendo influência sobre o poder calorífico superior, solubilidade em água fria, quente e teor de cinzas;
- b) nas épocas de primavera e verão, estação de crescimento das árvores, foram obtidos os menores teores de umidade; maiores poder calorífico líquido e com tendência de maiores poder calorífico superior, quantidade de extrativos e teor de cinzas na madeira com casca;
- c) as melhores épocas para a colheita foram a primavera e verão, respectivamente;
- d) o conjunto das propriedades avaliadas indica que o desempenho energético da biomassa colhida na primavera e verão será melhor, se a utilização for na forma recém colhida;
- e) o uso da biomassa na forma recém colhida não é indicada, pois mesmo nas melhores condições, as propriedades da biomassa conferirão à mesma baixo desempenho energético.

### 5.2 Quanto à época de estocagem

- a) A época de estocagem teve influência sobre o teor de umidade, solubilidade em água fria, quente e hidróxido de sódio e poder calorífico líquido, não tendo influência somente sobre o poder calorífico superior e teor de cinzas;
- b) A época de outubro a maio teve os maiores valores médios de solubilidade em água quente e em hidróxido de sódio, enquanto a época de agosto a fevereiro teve o menor valor médio de teor de umidade, e maior valor médio de poder calorífico líquido. A época de maio a

novembro teve os maiores valores médios de solubilidade em água fria e poder calorífico superior e o menor valor médio de teor de cinzas.

- c) O conjunto de todas as propriedades indica que as melhores épocas de estocagem foram entre outubro a maio e entre agosto a fevereiro.
- d) Se a biomassa florestal for colhida na saída do inverno ou primavera e permanecer sob estocagem durante o verão terá melhor desempenho na geração de energia.

## 6 REFERÊNCIAS

ANTUNES, B. M.F.; ALMEIDA, E.D.L. Biomassa: Produção e planejamento de energia elétrica. Coimbra: Universidade de Coimbra, 2003. 23 p. Relatório técnico. Disponível em: <<http://thor.deec.uc.pt/~ppee/docs0203/biomassa.pdf>> Acesso em: 28.set. 2004.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Aspectos técnicos da utilização da madeira e carvão vegetal como combustíveis. In: Seminário de Abastecimento Energético Industrial com Recursos Florestais, 2., 1982, São Paulo. Anais...São Paulo: Governo do Estado de São Paulo, 1982. p. 101-137.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e. V. **DIN 51900**: Determining the gross calorific value of solid and liquid fuels using the bomb calorimeter, and calculation of net calorific value. Berlim, 2000.

EPAGRI. Estação meteorológica. Lages: Estação Experimental de Pesquisa Agropecuária de Lages. 2006.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood. Chemistry, Ultrastructure, reactions**. New York: de Gruyter, 1989. 613 p.

GARSTANG, J.; WEEKES, A.; POULTER, R.; BARTLETT, D. Identification and characterisation of factors affecting losses in the large-scale, non-ventilated bulkstorage of wood chips and development of best storage practices. FES B/W2/00716/RESP.DTI/Pub urn 02/1535, 2002. 116 p. Relatório técnico.

HEDING, N. The critical moisture content. In: Conference held by the International Energy Agency (IEA) – Forestry Energy Programme Group C – Storing, drying and internal handling of wood fuels, 1984, Denmark. Proceedings.... Denmark: Danish Institute of Forest Technology, 1984. p. 6 – 11.

HILLEBRAND, K.; FLYKTMAN, M.; KALLIO, E. LEINONEN, A.; LINDH, T.; MARTTILA, M.; TIIHONEN, I. Production of multifuels on the terminal of peat production area. Jyväskylä Science Park. Project book, Part II, Peat and field biomass production. 1999.

JIRJIS, R. Effects of particle size and pile height on storage and fuel quality of comminuted *Salix viminalis*. Biomass and Bioenergy. v. 28, p. 193-201, 2005.

JIRJIS, R. Storage and drying of wood fuel. Biomass and Bioenergy. v. 9, issue 1-5, p. 181-190, 1995.

LEHTOVAARA, J. Calorific value – Status of the standardisation. In: International Conference “Standardisation of solid biofuels, 6<sup>th</sup>-7<sup>th</sup> October, 2004, Leipzig, Germany. Anais eletrônicos... Disponível em: <<http://www.energetik-leipzig.de/BioNorm/conference.htm>> Acesso em: 10 out. 2005.

MARTIN, F. M. Otros aprovechamientos forestales. Salamanca: Edita Fernando Martín Asín, 1997.

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. Dendroenergia: fundamentos e aplicações. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

NURMI, J. Longterm storage of fuel chips in large piles. Folia Forestalis. N° 767, p. 1-18, Agosto 1990.

NURMI, J. Measurement and evaluation of wood fuel. Biomass and Bioenergy. v. 2, issue 1-6, p. 157-171. 1992.

NURMI, J. The effect of whole-tree storage on the fuelwood properties of short-rotation *Salix* crops. Biomass and Bioenergy. v. 8, issue 4, p. 245-249. 1995.

QUIRINO, W.F.; VALE, A.T.; ANDRADE, A.P.A.; ABREU, V.L.S.; AZEREDO, A.C.S. Poder calorífico da madeira e de resíduos lignocelulósicos. *Biomassa e Energia*. v. 1, n. 2. p. 173-182. 2004.

Technical Association for the worldwide pulp, paper and converting industry. TAPPI standard Test Methods. **TAPPI 207**: Water solubility of wood. Atlanta. 1994a.

Technical Association for the worldwide pulp, paper and converting industry. TAPPI standard Test Methods. **TAPPI 211**: Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525°C. Atlanta. 1994b.

Technical Association for the worldwide pulp, paper and converting industry. TAPPI standard Test Methods. **TAPPI 212**: One percent sodium hydroxide solubility of wood and pulp. Atlanta. 1994c.

Technical Association for the worldwide pulp, paper and converting industry. TAPPI standard Test Methods. **TAPPI 257**: Sampling and preparing wood for analysis. Atlanta. 1994d.

Technical Association for the worldwide pulp, paper and converting industry. TAPPI standard Test Methods. **TAPPI 264**: Preparation of wood for chemical analysis (Including procedures of removal of extractive and determination of moisture content). Atlanta. 1994f.

TEIXEIRA, F. N.; LORA, E. E. S. Capítulo 2 - Suprimento energético para termelétricas. In: LORA, E. E. S.; NASCIMENTO, M. A. R. Geração termelétrica. Planejamento, projeto e operação. v. 1. Rio de Janeiro: Interciência, 2004. p. 31 – 86.

THÖRNQVIST, T. Drying and storage of forest residues for energy production. *Biomass, England*, v. 7, p. 125-134, 1985.

THÖRNQVIST, T. Energy change due to storage of logging residues. In: International conference on bioenergy, 1984, Göteborg. Proceedings...Sweden: Swedish University of Agricultural Sciences Department of Forest Products, 1984a. Research notes n° 152.

THÖRNQVIST, T. Projekt storskalig säsongslagring av trädbraänsle – en sammanfattning av etapp 1. Large-scale seasonal storage of tree fuel project –

summary of phase 1. Sweden: The Swedish University of Agricultural Sciences. Department of Forest Products, 1986. 50 p. Report n° 188.

THÖRNQVIST, T. Storing of forest residues and comminuted fuels from forest residues. In: Conference held by the International Energy Agency (IEA) – Forestry Energy Programme Group C – Storing, drying and internal handling of wood fuels, 1984, Denmark. Proceedings.... Denmark: Danish Institute of Forest Technology, 1984b. p. 16 – 18.

### **CAPÍTULO 3 - VARIAÇÃO DA QUALIDADE DA BIOMASSA FLORESTAL DURANTE A ESTOCAGEM, EM FUNÇÃO DA ESPÉCIE E TIPO DO MATERIAL**

#### **RESUMO**

Este trabalho teve o objetivo de determinar a influência da espécie, tamanho e forma da biomassa sobre as alterações em suas propriedades, durante a estocagem, visando o uso na geração de energia. O experimento foi realizado no município de Lages – SC, entre outubro de 2003 e fevereiro de 2005. Foram utilizadas toras com casca de *Pinus taeda* e *Eucalyptus dunnii* e constaneiras de *Pinus spp.*, estocadas em pilhas, por um período de seis meses. O material para análise foi coletado no estado recém colhido, com dois, quatro e seis meses de estocagem. Foram utilizados quatro lotes, colhidos e armazenados segundos as estações do ano, permanecendo sob estocagem entre os meses de outubro a maio; janeiro a agosto; maio a novembro e agosto a fevereiro. As propriedades avaliadas foram: o teor de umidade na base úmida, poder calorífico superior e líquido, composição química (extrativos) e teor de cinzas. Os resultados demonstram que a espécie que dá origem à biomassa foi mais importante para o poder calorífico superior, solubilidade em hidróxido de sódio, e teor de cinzas. A forma e tamanho tiveram maior influência no teor de umidade; extrativos solúveis em água fria e quente e poder calorífico líquido. O material que teve melhor comportamento durante a estocagem foi a costaneira de *Pinus*, com melhor desempenho das propriedades de teor de umidade, poder calorífico superior e inferior e teor de cinzas. A costaneira foi também o material mais heterogêneo, com relação às variações ocorridas durante o tempo de estocagem. Este material sofreu transformação, disponibilização e perdas mais intensas dos componentes extrativos, em comparação com as toras. Foi o único material que iniciou o processo de degradação com seis meses de estocagem, demonstrado pelo aumento da solubilidade em hidróxido de sódio, mas também com aumento do poder calorífico superior. As toras de *Pinus* tiveram o pior comportamento. De forma geral, e considerando as propriedades mais importantes para a geração de energia, o tamanho de forma do material teve maior influência que a espécie sobre o comportamento da biomassa na estocagem.

Palavras-chave: *Pinus taeda*; *Eucalyptus dunnii*; forma da biomassa, tamanho da biomassa, estocagem

#### **ABSTRACT**

**VARIABILITY OF THE WOOD FUEL QUALITY DURING THE STORAGE IN RELATION TO THE SPECIE AND SIZE DISTRIBUTION PARTICLE.** The present experiment aimed to verify the influence of the specie and size distribution particle over the changes in their characteristics, during the storage. The experiment was accomplished in Lages, in the State of Santa Catarina, Brazil, from October 2003 to February 2005, employing *Pinus taeda* and *Eucalyptus dunnii* logs with barks and

*Pinus* spp. edges which were stored for six months, with collecting fresh material, with two, four and six months of storing. Four lots of stored wood, according to the season of the year, were analyzed. The evaluated properties were: moisture content; gross calorific value and net calorific value, wood chemical composition (extractives) and ash content. The results of the study suggested that the specie which originated the wood fuel was more important for the gross calorific value, the sodium hydroxide solubility of wood and ash content, while the size distribution particle affected more the moisture content, the water solubility of wood and the net calorific value. The material that presented the best performance and heterogeneity, during the storage, was the *Pinus* edge. The worst results were obtained with the *Pinus* logs. Generally speaking, the size distribution particle influenced more, than did the specie, over the performance of the wood fuel during the storage.

Key-words: *Pinus taeda*; *Eucalyptus dunnii*; particles size distribution; storage

## 1 INTRODUÇÃO

Quando o assunto é estocagem de biomassa florestal para geração de energia, as principais fontes da matéria-prima são os resíduos, que podem ser industriais e florestais, ou a biomassa oriunda de florestas energéticas.

Porém, qualquer que seja a fonte, o material disponível para a estocagem terá formas e tamanhos variados. Quando oriundos de resíduos industriais estarão na forma de cavacos, serragem, costaneiras, refilos e destopos. E, quando oriundos de resíduos de plantios florestais destinados ao uso múltiplo ou de florestas energéticas estarão na forma de ponteiros de árvores, toras, galhos com e sem folhas.

A forma mais comum de armazenamento, principalmente na indústria, é em cavacos. Porém, segundo NURMI (1995, p. 245) e THÖRNQVIST (1988, p. 193) esta metodologia apresenta alguns problemas, sendo que o principal deles é a combustão espontânea. Neste contexto, o tamanho das partículas tem grande influência sobre as variações das propriedades da madeira ao longo da estocagem como observaram GARSTANG *et al* (2002, p. 81) e JIRJIS (2005, p. 199).

Neste sentido, para que se tenha a melhoria das propriedades da biomassa para a geração de energia, deve-se ter o controle sobre o tipo de material que será colocado sob estocagem. Isso porque, a espécie e origem, os componentes e o formato do material têm influência sobre o comportamento da biomassa frente ao armazenamento.

Estes fatores afetam em maior ou menor intensidade a velocidade e homogeneidade na perda de umidade, alterações químicas e biodegradação da biomassa, que, por sua vez, levam a perda de massa seca, mudanças no conteúdo energético e riscos de incêndio.

Estes fatores determinam ainda a forma de estocagem, que pode ser em pilhas, leiras, fardos ou outras formas; o volume estocado; o tempo de estocagem, e o manejo do material antes, durante e após esta operação.

Levando em consideração estes fatores, este trabalho objetivou a determinação da influência da espécie e da forma e tamanho da biomassa sobre as alterações em suas propriedades, durante a estocagem, visando o uso na geração de energia.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Influência da espécie que dá origem à biomassa florestal na qualidade do material sob estocagem

A biomassa florestal usada para a geração de energia inclui muitas espécies e componentes da mesma espécie, que diferem muito em relação às suas propriedades físicas e químicas. O papel da estocagem e dos processos de secagem, desde a colheita até a utilização, é muito importante, porém as características diferenciadas da biomassa tornam a escolha de uma única forma de estocagem muito difícil (JIRJIS, 1995, p. 187). Além disso, durante a estocagem, as propriedades do material mudam devido a processos físicos, químicos e microbiológicos (THÖRNQVIST, 1985, p. 126).

Segundo GARSTANG *et al* (2002, p. 15), a composição química da madeira é importante na interpretação do seu comportamento durante a estocagem. Pois, no armazenamento aeróbio, processo que ocorre em uma pilha de madeira, as primeiras alterações que ocorrem são nos extrativos (GARSTANG *et al*, 2002, p. 57).

Neste sentido, pode-se definir extrativos como compostos com uma grande variabilidade de componentes químicos, que representam uma pequena porcentagem da massa seca da madeira, denominados assim por serem extraídos a partir de solventes orgânicos neutros e água. Estes compostos são formados por inúmeros componentes individuais (BROWNING, 1963, p. 313, FENGEL e WEGENER, 1989,



p. 182 e SJÖSTRÖM, 1993, p. 90), de natureza hidrofílica ou lipofílica (SJÖSTRÖM, 1993, p. 90).

Os extrativos estão concentrados nos canais resiníferos e células de parênquima. Pequenas quantidades são também encontradas na lamela média, na parede célula e espaços intercelulares de traqueóides e fibras libriformes (FENGEL e WEGENER, 1989, p. 183).

Basicamente, os extrativos podem ser classificados, segundo sua composição química, em terpenos e terpenóides, graxas e gorduras (compostos alifáticos) e compostos fenólicos, além dos compostos inorgânicos que constituem as cinzas da madeira (SJÖSTRÖM, 1993, p. 92-107 e KLOCK, MUÑIZ e HERNANDEZ, 2006, p. 73). Por sua vez, estes compostos químicos se subdividem em inúmeros outros que estão presentes em quantidade e composição diferenciadas na madeira de Gimnospermas e Angiospermas.

Na Gimnospermas os principais extrativos são os ácidos resinosos, monoterpenos voláteis, terpenóides, ésteres de ácidos graxos e esteróides, sendo que a maioria dos polifenóis está concentrada no cerne. Nas Angiospermas, as resinas da madeira são constituídas geralmente de gorduras, ceras e esteróides (KLOCK, MUÑIZ e HERNANDEZ, 2006, p. 79).

Com relação à casca, esta difere da composição da madeira pela presença de polifenóis e suberina, menor porcentagem de polissacarídeos e maior porcentagem de extrativos (FENGEL e WEGENER, 1989, p. 244). Em estudos com casca de *Pinus taeda*, citados por FENGEL e WEGENER (1989, p. 244)<sup>37</sup>, foram observados valores que variaram entre 18,3 a 27,5% de extrativos, dependendo o tipo de solvente utilizado na extração.

NURMI (1999, p. 45), constatou que, na estocagem de resíduos florestais de *Picea abies*, durante um período de 9 meses, ocorreu o aumento significativo no conteúdo de carbono. O conteúdo de hidrogênio inicialmente foi de 6,6 %, sendo que depois de nove meses de estocagem este valor diminuiu para 5,7 %. A mudança

---

<sup>37</sup>MCGINNIS, G.D.; PARIKH, S. **Wood Science**. n. 7. 1975. p – 295-297.  
LABOSKY, P. **Wood Science**. n. 12. 1979. p – 80-85  
PEARL, I. A.; BUCHANAN, M.A. **TAPPI**. n. 59. 1976. p – 136-139.

significativa no conteúdo de hidrogênio foi principalmente causada pela perda de material volátil.

Os diferentes teores de lignina na madeira, oriunda de Gimnospermas e Angiospermas, fazem com que o nível de acessibilidade das bactérias e fungos à celulose e polioses seja diferente nestes dois grupos vegetais, resultando em variações na velocidade e intensidade da biodegradação (GARSTANG *et al*, 2002, p. 16), que por sua vez tem influência sobre a perda de massa e alterações no poder calorífico.

Em função dos maiores teores de lignina nas Gimnospermas, o processo de quebra da estrutura deste componente químico, e conseqüente abertura da estrutura da parede celular, que dá acesso à celulose, são mais difíceis nas espécies deste grupo. As Gimnospermas também têm, em média, menos celulose que as Angiospermas e menos pentoses disponíveis. Estes baixos níveis de pentoses impedem mudanças rápidas iniciais no pH durante a estocagem, e a maior lignificação reduz a eficácia das hemicelulases em produzir xilanas (GARSTANG *et al*, 2002, p. 15).

As Angiospermas, em contrapartida, têm maior teor de acetis e graxas, e maior potencialidade de produção de ácido acético, durante a estocagem. As pentoses são constituintes das graxas, que proporcionam às bactérias maior controle da acidificação nas pilhas (GARSTANG *et al* (2002, p. 15).

O fato da lignina ter maior proporção de carbono e hidrogênio em relação à celulose e polioses, faz com que esta tenha maior poder calorífico superior que os carboidratos, conferindo também às Gimnospermas maior poder calorífico em comparação com as Angiospermas. Além disso, a quantidade de extrativos na casca de coníferas é maior que em folhosas (NURMI, 1992, p. 45), também contribuindo para o aumento do poder calorífico.

MARTÍN (1997, p. 06) também concorda que o poder calorífico de Gimnospermas é maior, porém chama a atenção para o fato de que, em muitos casos, a maior massa específica das Angiospermas em comparação com as Gimnospermas, faz com que o poder calorífico por unidade de volume destas seja inferior aos das espécies de Angiospermas. Porém, no caso dos eucaliptos, o menor poder calorífico destes não pode ser compensado por sua relativa alta massa específica.

Com relação aos componentes do tronco das árvores, este é composto basicamente de madeira, casca interna e casca externa. A proporção destes varia com a altura comercial do tronco e idade da árvore (NURMI 1992, p. 157). A casca, apesar de estar presente em menor proporção, em relação a madeira, tem maior porcentagem de carbono e hidrogênio (LEVIN e REPYAH<sup>38</sup>, citados por NURMI 1992, p. 165)), fazendo com que tenha maior poder calorífico superior que a madeira.

No entanto, a madeira, por representar a maior proporção da massa do tronco, é o componente mais importante a ser considerado quando o poder calorífico superior do tronco como um todo é calculado (NURMI, 1992, p. 163).

QUIRINO *et al* (2004, p. 179-180) realizou um estudo onde reuniu dados do poder calorífico de 258 espécies florestais e chegou a conclusão de que o poder calorífico superior das madeiras variou de 4685 a 4736 kcal, ou seja, um poder calorífico médio de 4710 kcal/kg. Neste estudo, o autor afirmou ainda que esta propriedade varia relativamente pouco entre as espécies florestais.

Os valores de poder calorífico superior obtidos para madeiras do gênero *Pinus* variam entre 3900 a 5200 kcal/kg, e para madeiras do gênero *Eucalyptus* variam de 4200 a 5000 kcal/kg<sup>39</sup>.

O teor de cinzas varia muito em função da espécie de madeira e posição onde a amostra foi retirada na árvore. Esta propriedade varia também entre árvores do mesmo local de crescimento. Além disso, durante a colheita da biomassa, entre a floresta e a planta de geração de energia, o material pode ser contaminado através da adição de pedras e areia (THÖRNQVIST, 1985, p. 130). Os valores apresentados por BRITO e BARRICHELO (1982, p. 109) para espécies do gênero *Eucalyptus* variaram entre 0,41 a 0,53 % em árvores com quatro anos de idade.

## 2.2 Influência da forma e tamanho da biomassa florestal na qualidade do material sob estocagem

---

<sup>38</sup> LEVIN, E. D.; REPYAH, S. M. **Pererabotka drevesnoi zeleni. Moskva “Lesnaja promylennost”**. 1984. 120 p.

<sup>39</sup> BRITO e BARRICHELO (1982); ANTUNES e ALMEIDA (2003) e QUIRINO *et al* (2004).

Com relação à forma e tamanho da biomassa, inevitáveis problemas, como o aumento de temperatura, menor eficiência na perda de umidade, alta perda de massa e desenvolvimento de fungos, enfrentados durante a estocagem da biomassa na forma de cavacos, têm despertado o interesse dos pesquisadores em realizar experimentos com outras técnicas de estocagem. De forma geral, a estocagem na forma não particulada mantém a qualidade do combustível e tem sido foco de alguns estudos, apesar de certos volumes de madeira para combustível precisarem ser estocados na forma de partículas, servindo como estoque regulador (JIRJIS, 1995, p. 185).

Portanto, o tamanho da partícula de madeira afeta os resultados da estocagem. Os estudos comparando a estocagem de biomassa com grandes dimensões e cavacos têm demonstrado que a perda de massa e de teor de umidade é menor na estocagem da biomassa de maior dimensão (JIRJIS, 1995, p. 188).

Em contrapartida, a estocagem da biomassa florestal, em tamanho reduzido (cavacos) em pilhas, redistribui o conteúdo de umidade de forma que a região central fica mais seca e a região mais superficial da pilha fica mais úmida. Em geral, o limite entre as duas áreas é muito nítido (THÖRNQVIST<sup>40</sup>, citado por THÖRNQVIST (1985, p. 128)).

Além disso, os microrganismos colonizam o material orgânico em maior ou menor grau, durante a estocagem. O armazenamento da biomassa florestal em várias formas, especialmente quando em tamanho reduzido, freqüentemente cria condições favoráveis para estes organismos que são fortes produtores de esporos. Sob condições favoráveis (combustíveis florestais em tamanho reduzido, armazenados em pilhas), a razão de reprodução pode ser maior e haverá riscos de reações alérgicas em quem manuseia o material (THÖRNQVIST e LUNDSTRÖN<sup>41</sup>, THÖRNQVIST e LUNDSTRÖN<sup>42</sup>, citados por THÖRNQVIST, 1985, p. 126).

---

<sup>40</sup> THÖRNQVIST, T. **Drying of fuel chips with solar panel warmed air (English summary)**. Department of Forest Products, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala. 1982. Report n. 126.

<sup>41</sup> THÖRNQVIST, T.; LUNDSTRÖN, H. **Factors affecting the occurrence of fungi in fuel chips for domestic consumption (English summary)**. 1980. Report n. 117.

<sup>42</sup> THÖRNQVIST e LUNDSTRÖN. Health hazard caused by fungi in stored wood chips. **Forest Products journal**. V. 32, n.11/12, p. 29-32. 1982.

Além de reações alérgicas a biodegradação por bactérias, fungos e outros organismos contribuem para o aumento do teor de umidade, perda de massa e conseqüente prejuízo para o desempenho energético da biomassa na geração de energia.

JIRJIS (2005) avaliou a influência do tamanho das partículas e da altura das pilhas na qualidade energética de ramos particulados de *Salix*. O autor concluiu que, em relação ao teor de umidade, quanto menor o tamanho da partícula, maior é a variação do teor de umidade na altura da pilha, e maior a perda de umidade durante a estocagem, sendo que esta variação torna o combustível menos homogêneo. LEHTIKANGAS e JIRJIS<sup>43</sup>, citados por JIRJIS (1995, p. 185) mencionam que isso ocorre porque partículas finas absorvem mais umidade que as maiores, em períodos de umidade, existindo, portanto uma boa correlação entre o conteúdo de umidade e a proporção de finos no material armazenado.

Com relação à estocagem, segundo SJÖSTRÖM (1993, p. 107), depois da colheita das árvores, os extrativos lipofílicos (ácidos graxos; glicerídeos, ácidos resinosos, esteróis e esteril-ésteres) sofrem alteração em sua composição e começam a decrescer, tanto através de processos auto-oxidativos como enzimáticos.

A auto-oxidação e as reações enzimáticas são largamente influenciadas pelas condições prevalecentes durante a estocagem da madeira. Estas reações são muito mais rápidas na madeira estocada na forma de partículas que na estocada na forma de toras. Também é conhecido que a hidrólise dos trissacarídeos, que leva a formação de ácidos graxos livres, ocorre mais rapidamente na condição de estocagem de madeira úmida em relação à estocagem da madeira seca. (SJÖSTRÖM, 1993, p. 108).

Com relação ao poder calorífico, JIRJIS (2005, p. 199), concluiu que a variação nesta propriedade foi pequena em períodos de estocagem de dois a três meses, independentemente do tamanho das partículas e da altura da pilha. Além disso, o poder calorífico líquido está diretamente relacionado ao perfil de temperatura da pilha e este foi maior em partículas menores, que também apresentaram menor teor de umidade.

---

<sup>43</sup> LEHTIKANGAS, P.; JIRJIS, R. Hyggesrester i täckta vältor – nederbördens inverkan på bränslekvaliteten. Summary: Logging residues in covered windrows – influence of precipitation on fuel quality. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Products. Uppsala. 1995. Research notes n. 173.

THÖRNQVIST (1986, p. 07) encontrou variações energéticas devidas ao aumento ou diminuição do poder calorífico entre +2,5 % a – 12 %, em um período de estocagem de 8 meses, para madeira na forma de cavacos. THÖRNQVIST<sup>44</sup>, citado por THÖRNQVIST (1985, p. 131)) obteve perdas energéticas de 6,8 a 21,4 % em pilhas de biomassa florestal estocada na forma de cavacos, por um período de 6 a 9 meses. THÖRNQVIST (1984b, p. 18) verificou perdas do conteúdo de energia em torno de 18 % na biomassa recém gerada e particulada, estocada por um período de seis meses. No entanto, quando a biomassa não foi transformada em cavacos, em estocagem por seis meses, o ganho foi de 2 % no conteúdo energético. Além de outros fatores, este aumento é devido à secagem.

O tamanho das pilhas também tem influência sobre a variação energética. Pois NYLINDER e THÖRNQVIST<sup>45</sup>, citados por THÖRNQVIST (1985, p. 131) observaram ganhos energéticos de 4 % em pequenas pilhas (aproximadamente 120 m<sup>3</sup> empilhados na forma de meda) de biomassa florestal estocada por 9 meses. Enquanto que THÖRNQVIST<sup>46</sup>, citado por THÖRNQVIST (1985, p. 131) verificou perda de 3 %, em biomassa estocada em grandes pilhas (aproximadamente 600 m<sup>3</sup> empilhados na forma de meda), por um período de 6 meses. Quando o período foi estendido para 8 meses, em grandes pilhas, THÖRNQVIST<sup>47</sup> (1986), citado por THÖRNQVIST (1988, p. 193)) concluiu que as modificações energéticas no combustível variaram entre um aumento em energia de 2,5 % até uma perda de 12 %. As variações dependem das diferentes espécies de árvores, diferentes conteúdos de umidade no momento da confecção das pilhas e também dos diferentes métodos de preparação destas.

Portanto, pode-se concluir, com base nos trabalhos desenvolvidos por THÖRNQVIST (1986, 1985, 1984b, 1988) que a estocagem na forma de cavacos em grandes pilhas promove perdas energéticas maiores, enquanto que na biomassa com

---

<sup>44</sup> THÖRNQVIST, T. **The importance of cover and air underbase with storage of fuel chips (English summary)**. 1982. Report n. 127.

<sup>45</sup> NYLINDER, M.; THÖRNQVIST, T. **Storing of branches and tops of different fractions (English summary)**. 1981. Report n° 113.

<sup>46</sup> THÖRNQVIST, T. **Storing of desintegrated logging residuals (English summary)**. Uppsala. 1983. Report n. 137.

<sup>47</sup> THÖRNQVIST, T. **Projektet storskalig säsongslagring av trädbränsle – en sammanfattning av etapp 1. (Summary: Large-scale seasonal storage of tree fuel project - - summary of phase 1.)**. Uppsala. 1986. Report n. 188.

maiores dimensões em pilhas menores existem ganhos energéticos durante a estocagem.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

A avaliação da influência da espécie e do tamanho e forma da biomassa florestal, sob estocagem, sobre sua qualidade para o uso na geração de energia, foi realizada em toras com casca das espécies de *Pinus taeda* e *Eucalyptus dunnii*, com diâmetros variados<sup>48</sup> e comprimento médio de 2,4 m. Além das toras foram utilizadas costaneiras<sup>49</sup>, contendo ou não casca, de *Pinus spp.*, com comprimento médio de 2 m. O estudo foi realizado na cidade de Lages, Estado de Santa Catarina, entre outubro de 2003 a fevereiro de 2005.

Os dados meteorológicos do período de estudo estão apresentados na TABELA 3.1.

---

<sup>48</sup> Os diâmetros das toras utilizadas no estudo variaram de 8 a mais de 30 cm, pois o material de estudo foi constituído de madeira destinada à geração de energia (toras finas) e toras descartadas em processos industriais (toras grossas), sendo que esta variável não foi controlada no estudo.

<sup>49</sup> Costaneira é a nomenclatura dada às peças em forma de meia lua, obtidas na transformação de toras em blocos ou semi-blocos, através de serras de desdobro primário.

TABELA 3.1 – CONDIÇÕES CLIMÁTICAS NA REGIÃO DE LAGES - OUTUBRO DE 2003 A FEVEREIRO DE 2005

DADOS	ANO																
	2003			2004												2005	
	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev
Precipitação (mm)	119	94	225	81	114	144	82	103	28	233	52	278	162	104	136	147	47
Temperatura (°C)	18	19	20	21	21	20	19	13	13	12	14	17	17	19	20	22	22
Umidade relativa (%)	76	72	79	78	76	77	83	85	82	84	77	82	75	76	76	76	75

FONTE: EPAGRI

NOTA: A precipitação total do ano de 2004 foi de 1517 mm, e os valores médios de temperatura e umidade relativa foram 17°C e 79%, respectivamente.

Os dados meteorológicos foram levantados para o conhecimento das condições climáticas no período de realização do estudo. Isto é importante, pois os resultados obtidos em estudos de estocagem devem ser apresentados mencionando-se às condições climáticas observadas durante o período de análise, possibilitando assim estudos comparativos com outras regiões.

Os dados apresentados refletem as condições climáticas de anos típicos na região, porém não foram utilizados em cruzamentos com os dados obtidos nas análises realizadas, por não se constituir em objeto do estudo.

Foram utilizados quatro lotes, sendo que cada lote continha as três formas de biomassa analisada. Cada lote permaneceu sob estocagem durante seis meses, sendo realizadas amostragens para análise na biomassa recém colhida, com dois, quatro e seis meses de permanência no campo experimental. O delineamento, com relação aos lotes utilizados no estudo pode ser visualizado na TABELA 3.2.

Cada um dos três materiais avaliados foram estocados, separadamente, em pilhas com dimensões médias de 6 m de comprimento, 2,5 m de largura e 2,5 m de altura, e volume aproximado de 10 m<sup>3</sup>. Entre uma pilha e outra foi deixado um espaço de 3,5 m para facilitar a coleta e propiciar aeração.



TABELA 3.2 – DELINEAMENTO EXPERIMENTAL ADOTADO PARA A ANÁLISE DO EFEITO DA ESTOCAGEM SOBRE A QUALIDADE DA BIOMASSA FLORESTAL

LOTE	ÉPOCA DE ESTOCAGEM	MESES DE COLETA	NÚMERO DE DIAS DE ESTOCAGEM <sup>50</sup>
1	Outubro/2003 a maio/2004	Outubro Novembro Março Maio	Recém-coletado 31 dias (20 dias - costaneira) 139 dias (128 dias – costaneira) 200 dias (180 dias – costaneira)
2	Janeiro/2004 a agosto/2004	Janeiro Abril Junho Agosto	Recém-coletado 69 dias 127 dias 190 dias
3	Maio/2004 a novembro/2004	Maio Junho Setembro Novembro	Recém-coletado 49 dias 124 dias 180 dias
4	Agosto/2004 a Fevereiro/2005	Agosto Outubro Novembro Fevereiro	Recém-coletado 56 dias 105 dias 183 dias

FONTE: O autor.

As pilhas foram construídas de forma que o comprimento das toras ficasse no sentido leste-oeste, para que houvesse máxima radiação solar sobre a superfície das mesmas, conforme orientação de HILLEBRAND *et al.* (1999). Este autor afirma que a construção das pilhas de estocagem tem efeito significativo sobre a homogeneidade da secagem de resíduos de colheita. Os detalhes da montagem das pilhas e posicionamento destas no pátio são apresentados nas Fotos do APÊNDICE I.

Em cada amostragem foram coletadas toras com casca e costaneiras na base, meio e topo das pilhas. Sem haver remoção da casca, as toras e costaneiras foram transformadas em cavacos, nos quais foram realizadas as determinações das propriedades físicas e químicas da biomassa florestal<sup>51</sup>.

<sup>50</sup> A variação observada no tempo de coleta, em dias, foi devida a condições climáticas adversas, falta de pessoal; indisponibilidade de máquinas para a confecção das pilhas, coleta ou transporte do material, ou outros fatores de força maior.

<sup>51</sup> As definições das propriedades utilizadas para avaliar a qualidade da biomassa frente à estocagem estão no Glossário.

O teor de umidade na base úmida<sup>52</sup> foi determinado nos cavacos recém obtidos das toras e costaneiras. Para as análises químicas, os cavacos foram secados e transformados em serragem, de acordo com as Normas TAPPI 257 (*Sampling and preparing wood for analysis*) e TAPPI 264 (*Preparation of wood for chemical analysis (Including procedures of removal of extractive and determination of moisture content)*). Após esta preparação foram determinados o poder calorífico superior e líquido, solubilidade em água fria, quente, hidróxido de sódio, e teor de cinzas.

O teor de umidade na base úmida foi determinado através da diferença de pesagem entre o material úmido, como recebido para análise, e após secagem em estufa a  $103 \pm 2$  °C, até peso constante, através da Equação 4.1, apresentada por NOGUEIRA e LORA (2003).

$$H_s = (P_t - P_s)/P_t \quad \text{Equação 4.1}$$

Onde:

$H_s$  = teor de umidade na base úmida (%)(kg água/kg material nas condições de trabalho)

$P_t$  = massa da amostra úmida (g), na condição de queima;

$P_s$  = massa da amostra seca (g), estado da biomassa seca em estufa a 105°C, até peso constante.

O poder calorífico superior e poder calorífico inferior na base úmida (poder calorífico líquido) foram determinados em bomba calorimétrica Marca IKA, Modelo 2000, utilizando-se a Norma DIN 51900 (*Determining the gross calorific value of solid and liquid fuels using the bomb calorimeter, and calculation of net calorific value*). O poder calorífico líquido foi obtido na bomba calorimétrica através do fornecimento dos dados de teor de umidade na base úmida, teor de cinzas e porcentagem de hidrogênio da amostra, que foi padronizado em 6%.

---

<sup>52</sup> No caso do uso da madeira para a geração de energia, a informação relativa à umidade deve-se referir ao peso total, até mesmo porque, esta é a base mais utilizada nos cálculos do poder calorífico líquido. Além disso, esta é a base de referência normalmente encontrada na literatura, facilitando as comparações e discussões do trabalho.

A determinação da solubilidade da madeira em água fria e quente obedeceu à norma TAPPI T 207 (*Water solubility of wood and pulp*) e solubilidade em hidróxido de sódio a Norma TAPPI 212 (*One percent sodium hydroxide solubility of wood and pulp*). A avaliação da composição química quantitativa da madeira foi incluída neste trabalho, pois a quantidade de extrativos obtidos nas diferentes épocas e períodos de estocagem pode indicar as alterações químicas ocorridas na biomassa em função da estocagem.

O teor de cinzas foi obtido, na base seca, conforme Norma TAPPI 211 (*Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525 °C*).

O tratamento dos dados e os resultados obtidos foram avaliados de forma separada para cada espécie e forma da biomassa, considerando ainda as diferenças ocorridas em função do tempo de estocagem de cada material.

O tratamento estatístico dos dados foi feito através da ANOVA/MANOVA, utilizando-se o teste F para verificação de variação significativa ao nível de 95 %, e confirmação da variação através do Teste de média de Tukey.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Teor de umidade

Os materiais colocados sob estocagem apresentaram diferença significativa para o teor de umidade na base úmida, tanto em função da espécie, como da forma e tamanho do material, como pode ser visualizado nas TABELAS 3.3 e 3.4 (APÊNDICE II). Os valores extremos de teor de umidade variaram entre 12 % na costaneira de *Pinus* até 65% nas toras de *Pinus* com casca. O maior teor de umidade médio também foi observado na madeira de *Pinus* com casca (53 %) e o menor na costaneira (31 %), como pode ser visualizado na TABELA 3.5.

TABELA 3.5 - VARIAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE NA BASE ÚMIDA, EM FUNÇÃO DA ESPÉCIE E DO TAMANHO E FORMA DA BIOMASSA FLORESTAL

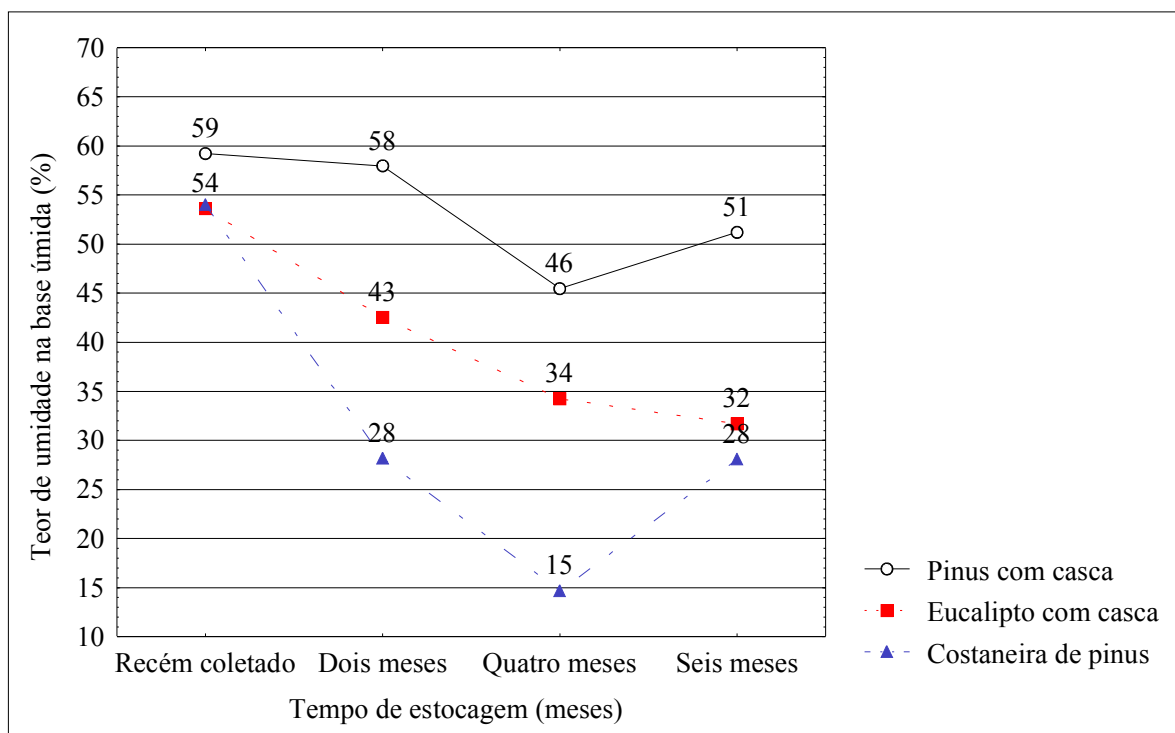
TEOR DE UMIDADE NA BASE ÚMIDA (%)	TIPO DA BIOMASSA FLORESTAL		
	Toras de <i>Pinus</i> com casca	Toras de <i>Eucalyptus</i> com casca	Costaneira de <i>Pinus</i>
Média	53a	41b	31c
Mínimo	24	27	12
Máximo	65	59	58
Desvio padrão	9,41	9,81	16,41

FONTE: O autor

NOTA: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

Considerando a interação entre o tipo de biomassa, em função do tempo de estocagem, também houve diferença significativa tanto em função da espécie, do tamanho e forma da biomassa, e do tempo de estocagem (GRÁFICO 3.1 e TABELAS 3.6 e 3.7 – APÊNDICE II).

GRÁFICO 3.1 – VARIAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE NA BASE ÚMIDA, EM FUNÇÃO DA ESPÉCIE E DA FORMA E TAMANHO DA BIOMASSA FLORESTAL, EM DIFERENTES PERÍODOS DE ESTOCAGEM



FONTE: O autor

No material recém colhido, a biomassa apresentou teor de umidade estatisticamente igual, independente da espécie ou tamanho e forma do material constituinte da mesma. Com dois e quatro meses de estocagem, os materiais foram diferentes entre si, tanto em termos de espécie como em termos de tamanho e forma da biomassa. A costaneira de *Pinus* teve o melhor comportamento, com maior perda de teor de umidade (28 e 15 %, com 2 e 4 meses de estocagem), seguido das toras de *Eucalyptus* (43 e 34 %, com 2 e 4 meses de estocagem). O material com pior comportamento foi o *Pinus* na forma de tora (58 e 46 %, com 2 e 4 meses de estocagem). Portanto, a forma e tamanho como o material é estocado teve maior influência sobre a perda de umidade que a espécie que deu origem à biomassa.

Com seis meses de estocagem as toras de *Eucalyptus* (32 %) e as costaneiras de *Pinus* (28 %) apresentaram médias estatisticamente iguais, sendo ambos os materiais diferentes das toras de *Pinus* (51 %) que apresentaram o maior teor de umidade. Com seis meses de estocagem, o *Pinus* voltou a absorver umidade, porém este comportamento foi mais acentuado nas toras, indicando que a forma da biomassa contribui para a minimização dos efeitos negativos da estocagem prolongada, mas é a espécie que determina a continuidade na perda de umidade ou no ganho da mesma.

O tempo de estocagem também variou em função da espécie e do tamanho e forma, sendo que para as costaneiras de *Pinus* são necessários dois meses de estocagem para se alcançar o teor de umidade mínimo para a geração de energia, enquanto para *Eucalyptus* são necessários 4 meses.

A costaneira, que tem maior área superficial em relação ao seu volume e menores dimensões, teve o melhor comportamento na perda de umidade durante a estocagem, confirmando as observações feitas por JIRJIS (1995).

#### 4.2 Composição química

A espécie e tamanho e forma da biomassa não tiveram influência sobre a quantidade de extrativos solúveis em água fria (TABELAS 3.8 e 3.9 – APÊNDICE II). Os valores extremos variaram desde 0,36 % em costaneiras de *Pinus* a 6,03 % na madeira com casca de *Eucalyptus*. A maior quantidade média de extrativos foi

observada na madeira de *Eucalyptus* (2,76%) e a menor na madeira de *Pinus*, na forma de toras (2,26%) (TABELA 3.10).

TABELA 3.10 - VARIAÇÃO DA SOLUBILIDADE DA MADEIRA COM CASCA EM ÁGUA FRIA, EM FUNÇÃO DA ESPÉCIE E DO TAMANHO E FORMA DA BIOMASSA FLORESTAL

SOLUBILIDADE EM ÁGUA FRIA (%)	TIPO DA BIOMASSA FLORESTAL		
	Toras de <i>Pinus</i> com casca	Toras de <i>Eucalyptus</i> com casca	Costaneira de <i>Pinus</i>
Média	2,26a	2,76a	2,44a
Mínimo	0,43	1,12	0,36
Máximo	3,57	6,03	6,01
Desvio padrão	1,10	1,16	1,35

FONTE: O autor

NOTA: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

A análise da interação entre tipo de biomassa e o tempo de estocagem demonstrou que a quantidade de extrativos solúveis em água fria foi influenciada somente pelo tempo de estocagem, mas não pela espécie e tamanho e forma do material (TABELAS 3.11 e 3.12 – APÊNDICE II).

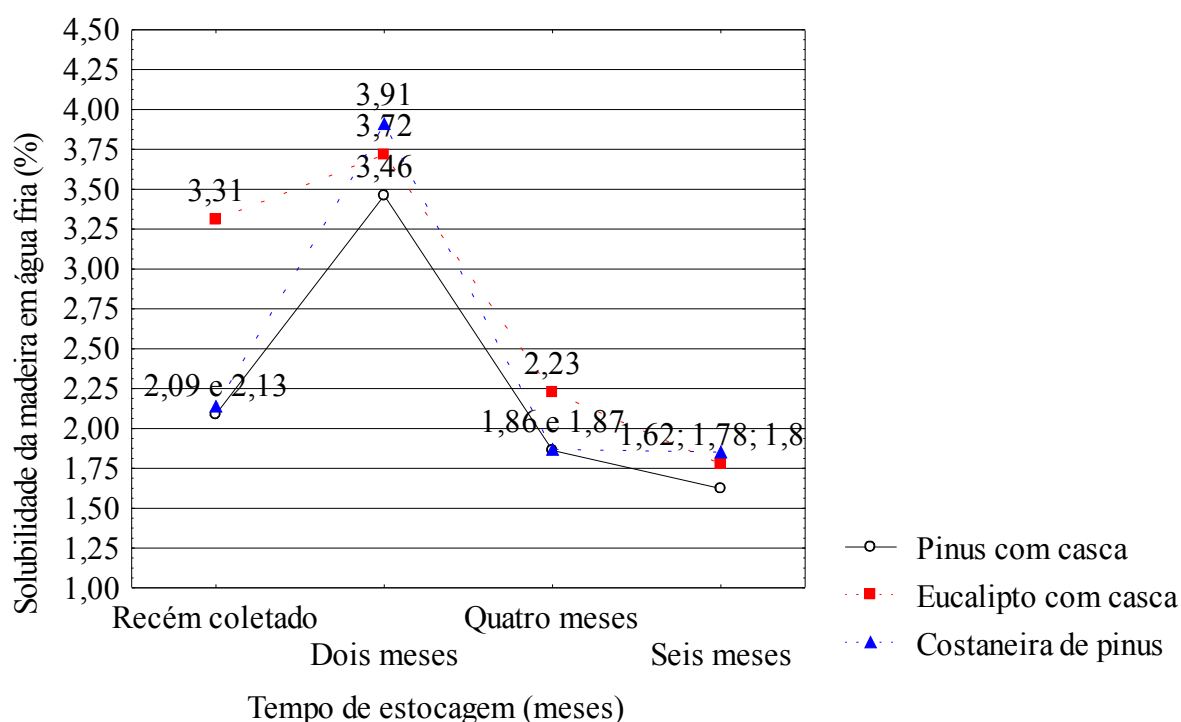
A solubilidade dos extrativos aumentou após dois meses de estocagem, em função da transformação e disponibilização dos mesmos, sem que houvesse a perda para o meio. Após este período, além de ocorrer a transformação e disponibilização, ocorreu também a perda para o meio, fazendo com que a quantidade de extrativos solúveis em água fria diminuísse gradativamente até o final do período de estocagem (GRÁFICO 3.2).

O *Eucalyptus*, seguido da costaneira de *Pinus* apresentaram os maiores valores de extrativos solúveis em água fria. Este resultado confirma as observações feitas por GARSTANG *et al* (2002) e NURMI (1999), com relação à composição química de espécies de Gimnospermas e Angiospermas.

Neste caso, apesar da diferença não ser significativa, é o formato da costaneira que permite que as transformação e disponibilizações ocorram com maior intensidade, em relação à tora da mesma espécie. Em relação ainda à espécie, pode-se perceber que o *Pinus* apresenta uma diferença maior entre os valores iniciais e aos 2 meses de estocagem. Isso porque a estrutura anatômica da madeira, e a constituição química

propiciam maior intensidade na reação de transformação dos compostos químicos, em comparação com o *Eucalyptus*.

GRÁFICO 3.2 - VARIAÇÃO DA SOLUBILIDADE DA MADEIRA COM CASCA EM ÁGUA, EM FUNÇÃO DA ESPÉCIE E DA FORMA E TAMANHO DA BIOMASSA FLORESTAL, EM DIFERENTES PERÍODOS DE ESTOCAGEM



FONTE: O autor

Com relação à solubilidade em água quente, a análise estatística provou que existiu diferença com relação ao tamanho e forma, mas não para a espécie da biomassa (TABELAS 3.13 e 3.14 – APÊNDICE II). Os valores extremos variaram desde 0,64 % em toras de *Pinus* a 7,46 % em toras de *Eucalyptus*. Assim, as costaneiras de *Pinus* (3,46 %) e as toras de *Eucalyptus* (3,72 %) foram iguais, enquanto as toras de *Pinus* (2,98 %) e as toras de *Eucalyptus* foram diferentes entre si. Portanto, as duas espécies quando estocadas na forma de toras terão comportamento diferenciado em relação aos processos de transformação, disponibilização e perda dos extrativos solúveis em água quente (TABELA 3.15).

TABELA 3.15 - VARIAÇÃO DA SOLUBILIDADE DA MADEIRA COM CASCA EM ÁGUA QUENTE, EM FUNÇÃO DA ESPÉCIE E DO TAMANHO E FORMA DA BIOMASSA FLORESTAL

SOLUBILIDADE EM ÁGUA QUENTE (%)	TIPO DA BIOMASSA FLORESTAL		
	Toras de <i>Pinus</i> com casca	Toras de <i>Eucalyptus</i> com casca	Costaneira de <i>Pinus</i>
Média	2,98b	3,72a	3,46ab
Mínimo	0,64	1,21	0,96
Máximo	5,02	7,46	6,21
Desvio padrão	1,18	1,30	1,80

FONTE: O autor

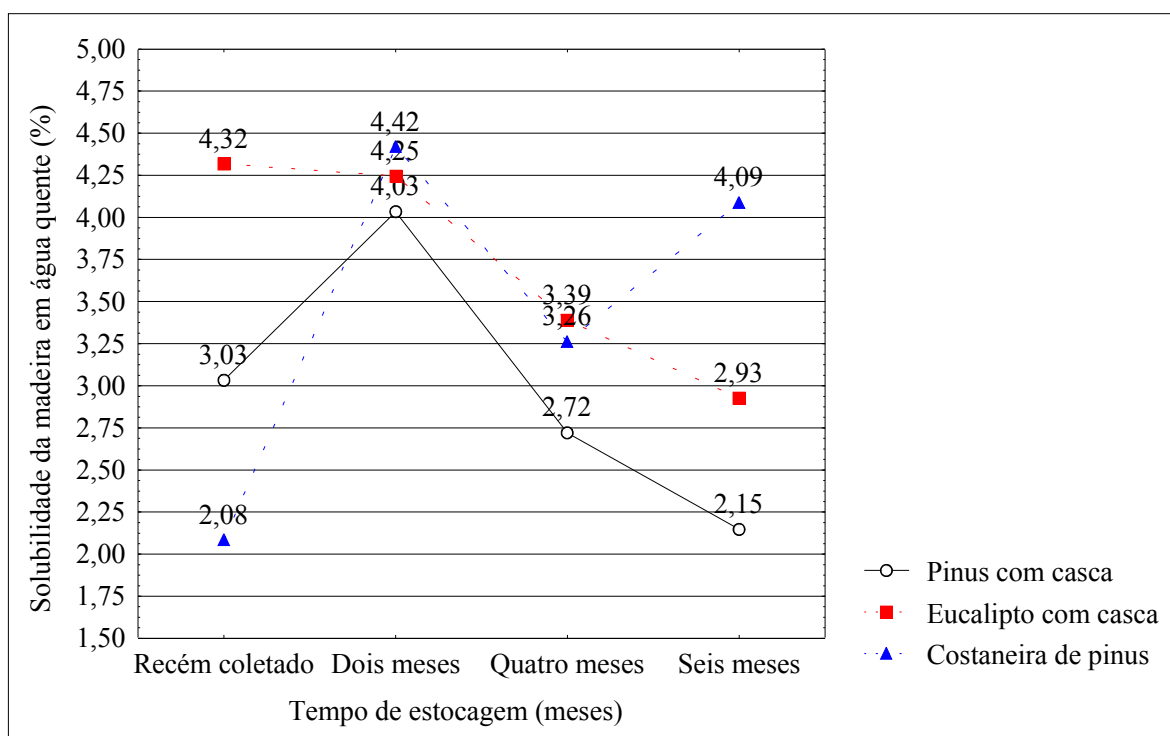
NOTA: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

Na avaliação da interação da espécie e do tamanho e forma da biomassa com o tempo de estocagem, existiu diferença significativa no efeito interação material versus tempo (TABELAS 3.16 e 3.17 – APÊNDICE II ). Porém, existe diferença somente entre os materiais no estado recém colhido, entre as toras de *Eucalyptus* (4,23 %) e as costaneiras de *Pinus* (2,08 %), sendo que a solubilidade para as toras de *Pinus* (3,03 %) foi igual aos dois valores anteriores. Neste caso, o tamanho e forma da biomassa tiveram mais influência que a espécie.

O comportamento da solubilidade do *Pinus* em água quente foi similar à água fria, enquanto o *Eucalyptus* apresentou decréscimo contínuo ao longo do tempo de estocagem. O aumento da solubilidade em água quente, para costaneira, aos seis meses de estocagem indicou que este material começou a sofrer um processo de degradação, sendo confirmado pelo aumento da solubilidade em hidróxido de sódio (GRÁFICOS 3.3 e 3.4). Portanto, o tamanho e forma da biomassa tiveram maior influência sobre a degradação que a espécie, durante o tempo de estocagem aplicado ao estudo.



GRÁFICO 3.3 - VARIAÇÃO DA SOLUBILIDADE DA MADEIRA COM CASCA EM ÁGUA QUENTE, EM FUNÇÃO DA ESPÉCIE E DA FORMA E TAMANHO DA BIOMASSA FLORESTAL, EM DIFERENTES PERÍODOS DE ESTOCAGEM



FONTE: O autor

Considerando, a solubilidade em hidróxido de sódio, existiu diferença significativa entre as espécies de biomassa, mas não com relação ao tamanho e forma, dentro da mesma espécie (TABELAS 3.18 e 3.19 – APÊNDICE II ). Os valores variaram desde 7,73 % na costaneira de *Pinus* até 18,87 % em toras de *Eucalyptus*. A solubilidade da madeira com casca das toras de *Eucalyptus* (14 %) foi diferente das toras de *Pinus* (12,39 %) e das costaneiras de *Pinus* (12,48 %) (TABELA 3.20).

Já no efeito interação entre tipo de biomassa e tempo de estocagem, não houve diferença significativa, quando aplicado o Teste F (TABELAS 3.21– APÊNDICE II ), porém houve diferença para a biomassa recém coletada no Teste de Tukey (TABELA 3.22 - – APÊNDICE II ). Assim, na condição recém colhida, a costaneira de *Pinus* (12,43 %) foi diferente estatisticamente das toras de *Eucalyptus* (16,49 %).

TABELA 3.20 - VARIAÇÃO DA SOLUBILIDADE DA MADEIRA COM CASCA EM HIDRÓXIDO DE SÓDIO, EM FUNÇÃO DA ESPÉCIE E DO TAMANHO E FORMA DA BIOMASSA FLORESTAL

SOLUBILIDADE EM HIDRÓXIDO DE SÓDIO (%)	TIPO DA BIOMASSA FLORESTAL		
	Toras de <i>Pinus</i> com casca	Toras de <i>Eucalyptus</i> com casca	Costaneira de <i>Pinus</i>
Média	12,39b	14,00a	12,48b
Mínimo	8,87	9,09	7,73
Máximo	17,27	18,87	17,01
Desvio padrão	2,45	2,54	3,07

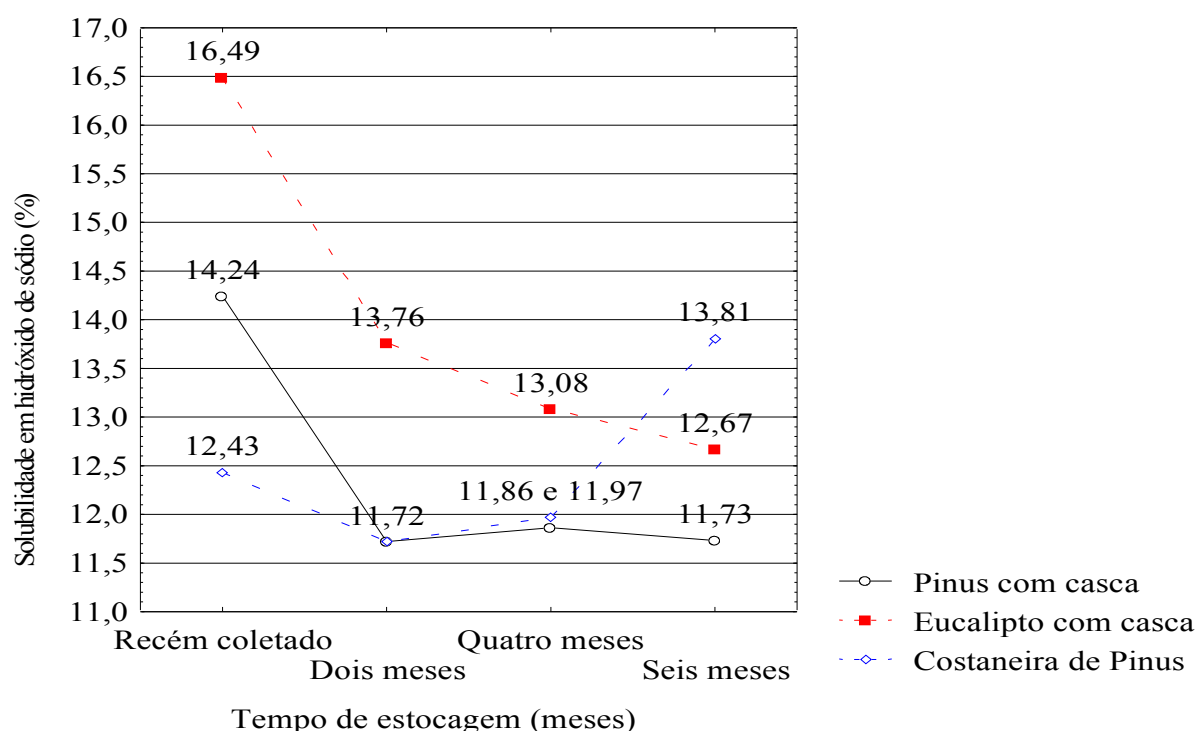
FONTE: O autor

NOTA: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

Os resultados da solubilidade da madeira com casca indicam que somente a costaneira começou a sofrer o processo de degradação com 6 meses de estocagem, permanecendo os demais materiais sem este efeito. Este fato foi comprovado pelo aumento da solubilidade em água quente e hidróxido de sódio, aos seis meses de estocagem.

Na costaneira, portanto, aos seis meses de estocagem iniciaram-se as transformações e perda de componentes como as polioses e degradação da celulose, com conseqüente conversão em extrativos solúveis em água. Estas alterações promoveram mudanças nas proporções entre os constituintes estruturais e não estruturais da madeira (celulose, polioses e lignina), fazendo com que o aumento proporcional da lignina, aumentasse também o poder calorífico superior do material, no mesmo tempo de estocagem (GRÁFICO 3.4).

GRÁFICO 3.4 - VARIAÇÃO DA SOLUBILIDADE DA MADEIRA COM CASCA EM HIDRÓXIDO DE SÓDIO, EM FUNÇÃO DA ESPÉCIE E DA FORMA E TAMANHO DA BIOMASSA FLORESTAL, EM DIFERENTES PERÍODOS DE ESTOCAGEM



FONTE: O autor

#### 4.3 Poder calorífico

Os materiais colocados sob estocagem apresentaram diferença significativa para o poder calorífico superior, tanto em função da espécie, como em função da forma do material, como pode ser visualizado nas TABELAS 3.23 e 3.24 (APÊNDICE II). Os valores extremos de poder calorífico superior variaram entre 4462 kcal/kg no *Eucalyptus* com casca até 4927 kcal/kg em *Pinus* com casca. O maior valor médio de poder calorífico superior foi observado no *Pinus* com casca e o menor no *Eucalyptus* com casca (GRÁFICO 3.5 E TABELA 3.25), concordando com BRITO e BARRICHELO (1982), NURMI (1992) e MARTIN (1997), que afirma que as Gimnospermas tem maior poder calorífico superior que as Angiospermas.

TABELA 3.25 – VARIAÇÃO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR, EM FUNÇÃO DA ESPÉCIE E DO TAMANHO E FORMA DA BIOMASSA FLORESTAL

PODER CALORÍFICO SUPERIOR (kcal/kg)	TIPO DA BIOMASSA FLORESTAL		
	Toras de <i>Pinus</i> com casca	Toras de <i>Eucalyptus</i> com casca	Costaneira de <i>Pinus</i>
Média	4806a	4595c	4770b
Mínimo	4696	4462	4565
Máximo	4927	4748	4876
Desvio padrão	59,01	62,26	79,61

FONTE:O autor

NOTA: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

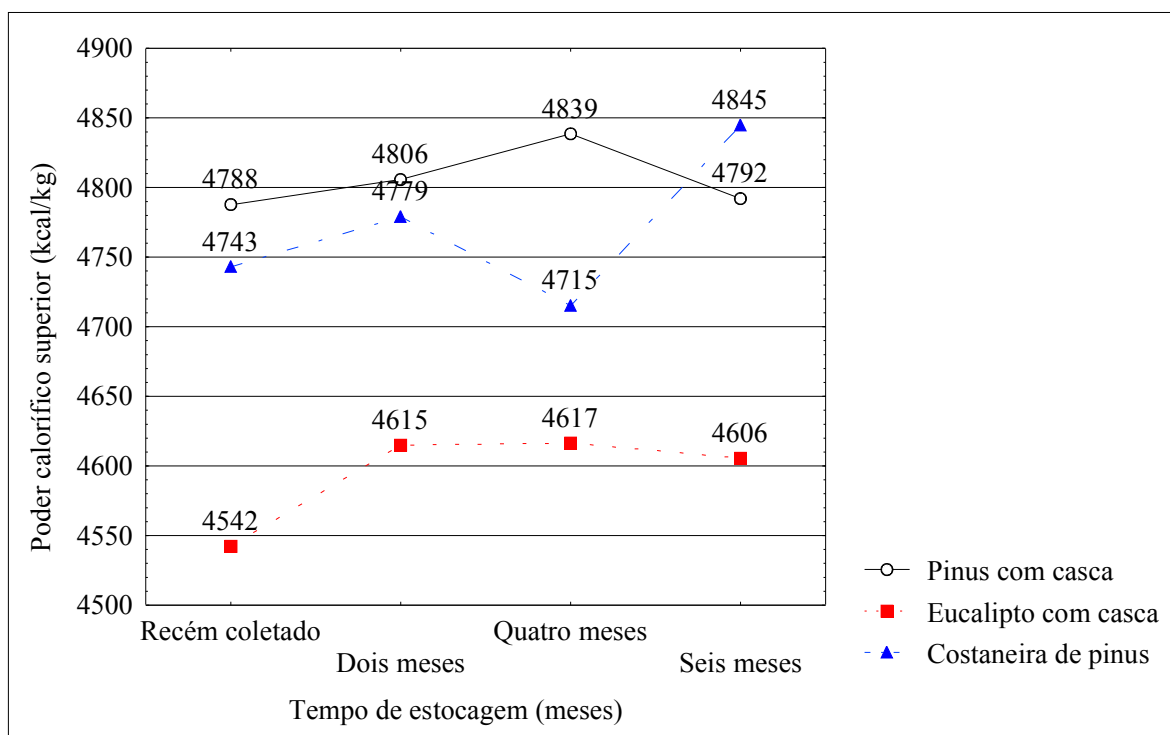
Considerando a interação entre o tipo de biomassa em função do tempo de estocagem, houve diferença significativa para o poder calorífico superior somente em função do tamanho e forma da biomassa, mas não em função do tempo de estocagem (TABELAS 3.26 e 3.27 – APÊNDICE II).

O poder calorífico superior foi diferente entre o *Eucalyptus* e o *Pinus* em todos os tempos de estocagem. No material recém-coletado, com dois e seis meses, para o *Pinus*, o tamanho e forma não afetaram os valores de poder calorífico, sendo que somente no período de quatro meses todos os materiais foram diferentes entre si (GRÁFICO 3.5).

Para a costaneira, tanto nas avaliações de solubilidade em água quente e hidróxido de sódio, quanto no poder calorífico, aos seis meses de estocagem ocorre um leve aumento dos valores obtidos. Isso porque, as análises de solubilidade indicam início da degradação, com conversão dos componentes da madeira, principalmente da celulose e polioses, e permanência da lignina, com a formação de extrativos solúveis em água. Estas alterações químicas promovem o aumento do poder calorífico superior do material.

Para os três materiais analisados, houve ganho no poder calorífico, em relação aos valores iniciais, após seis meses de estocagem, da ordem de 2,15 %, 1,41 % e 0,08 % para a costaneira, toras de *Eucalyptus* e *Pinus*, respectivamente, concordando com o observado por JIRJIS (2005) e THÖRNQVIST (1984b), sendo que este último obteve ganhos de 2 % após seis meses de estocagem em biomassa com maiores dimensões.

GRÁFICO 3.5 – VARIAÇÃO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR, EM FUNÇÃO DA ESPÉCIE E DO TAMANHO E FORMA DA BIOMASSA FLORESTAL, EM DIFERENTES PERÍODOS DE ESTOCAGEM



FONTE: O autor

Para o poder calorífico líquido, houve diferença significativa entre os materiais analisados (TABELA 4.28 e 4.29 – APÊNDICE II). Os valores extremos variaram entre 1195 kcal/kg a 3798 kcal/kg (TABELA 3.30). O material com maior média de poder calorífico líquido foi a costaneira de pinus, e o menor foi para as toras de pinus com casca (GRÁFICO 3.6). Neste aspecto, o tamanho e forma do material tiveram maior importância que a espécie, pois os valores médios extremos são para a mesma espécie, porém com formato diferente. Como a costaneira apresentou melhor secagem durante a estocagem, seu poder calorífico líquido foi mais elevado. Em contrapartida, as toras de *Pinus* tiveram menor perda de teor de umidade, resultando em menores valores de poder calorífico líquido.

TABELA 3.30 - VARIAÇÃO DO PODER CALORÍFICO LÍQUIDO, EM FUNÇÃO DA ESPÉCIE E DO TAMANHO E FORMA DA BIOMASSA FLORESTAL

PODER CALORÍFICO LÍQUIDO (kcal/kg)	TIPO DA BIOMASSA FLORESTAL		
	Toras de <i>Pinus</i> com casca	Toras de <i>Eucalyptus</i> com casca	Costaneira de <i>Pinus</i>
Média	1774a	2305b	2891a
Mínimo	1195	1419	1515
Máximo	3269	2988	3798
Desvio padrão	480,24	494,38	824,18

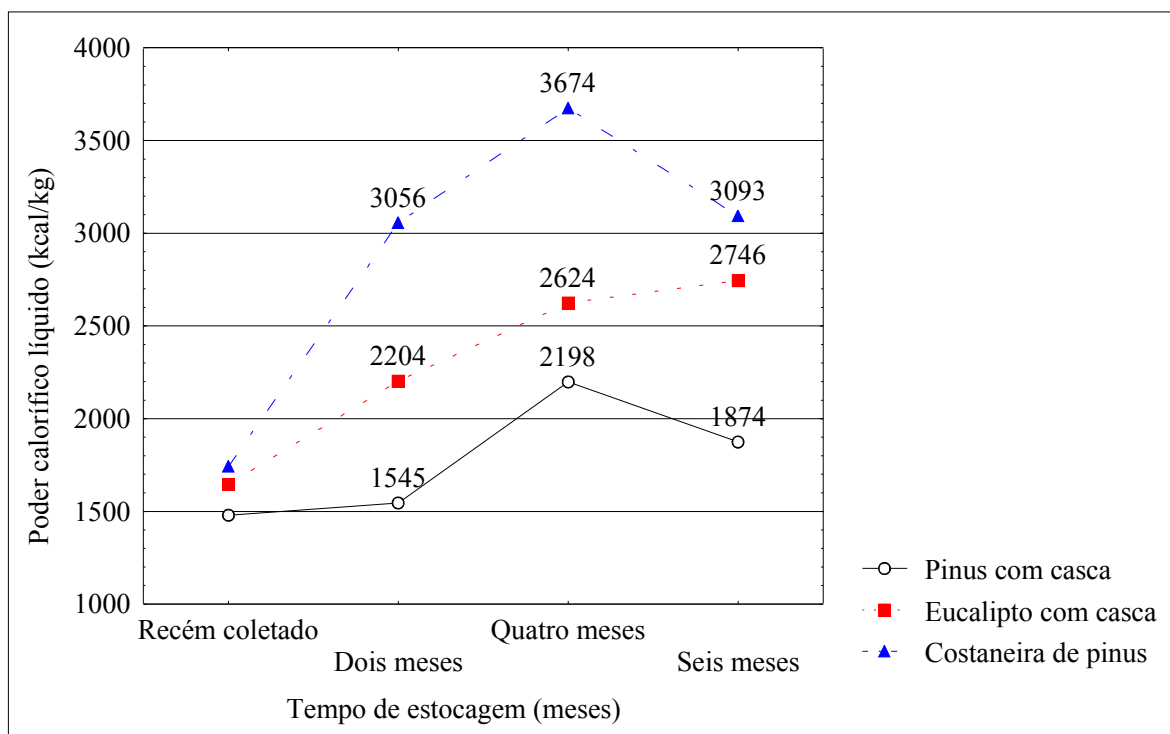
FONTE: O autor

NOTA: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

Analisando-se a interação entre o tipo de material e o tempo de estocagem, houve diferença significativa entre os materiais nos diferentes tempos de estocagem (TABELAS 3.31 e 3.32 – APÊNDICE II).

Os materiais não apresentaram diferença significativa entre os valores de poder calorífico líquido, no estado recém chegado. Aos dois meses de estocagem, todos os materiais diferiram entre si, sendo que a costaneira apresentou o maior valor médio de poder calorífico líquido (3056 kcal/kg). Após quatro meses, a costaneira continuou diferindo das toras de *Pinus* e de *Eucalyptus*, continuando a apresentar o maior valor médio (3674 kcal/kg), sendo que os demais materiais foram semelhantes. Com seis meses de estocagem, as toras de *Pinus* diferiram dos demais materiais com o menor valor médio (1875 kcal/kg). O comportamento do poder calorífico líquido foi igual ao comportamento do teor de umidade na base úmida, devido à estreita relação entre estas duas variáveis (GRÁFICO 3.6).

GRÁFICO 3.6 - VARIAÇÃO DO PODER CALORÍFICO LÍQUIDO, EM FUNÇÃO DA ESPÉCIE E DA FORMA E TAMANHO DA BIOMASSA FLORESTAL, EM DIFERENTES PERÍODOS DE ESTOCAGEM



FONTE: O autor

#### 4.4 Teor de cinzas

A espécie constituinte da biomassa teve influência sobre os teores de cinzas obtidos, mas não o tamanho e forma dentro da mesma espécie (TABELAS 3.33 e 3.34 – APÊNDICE II ). O menor valor obtido foi de 0,23 %, na costaneira, e o maior foi de 1,98 % nas toras com casca de *Eucalyptus*. As toras de *Pinus* com casca (0,42 %) foram iguais às costaneiras de *Pinus* (0,32 %), sendo ambas diferentes das toras de *Eucalyptus* com casca (0,85 %) (TABELA 3.35).

TABELA 3.35 - VARIAÇÃO DO TEOR DE CINZAS DA MADEIRA COM CASCA, EM FUNÇÃO DA ESPÉCIE E DO TAMANHO E FORMA DA BIOMASSA FLORESTAL

TEOR DE CINZAS (%)	TIPO DA BIOMASSA FLORESTAL		
	Toras de <i>Pinus</i> com casca	Toras de <i>Eucalyptus</i> com casca	Costaneira de <i>Pinus</i>
Média	0,42b	0,85a	0,32b
Mínimo	0,33	0,49	0,23
Máximo	0,57	1,98	0,40
Desvio padrão	0,05	0,42	0,05

FONTE: O autor

NOTA: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

Considerando a interação tempo e material (TABELAS 3.36 e 3.37 – APÊNDICE II ) ficou confirmado que a variação do teor de cinzas somente ocorreu em função da espécie, não variando para a forma e tamanho ou tempo de estocagem.

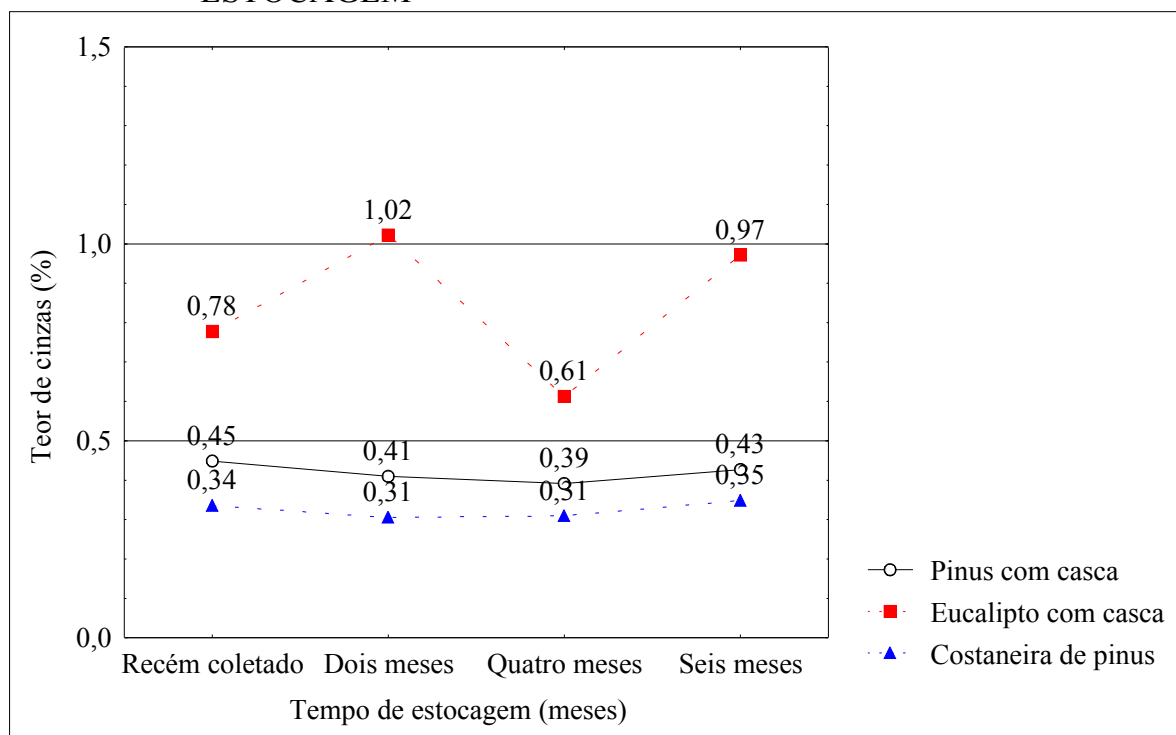
No material recém-coletado houve diferença significativa entre a costaneira e as toras de *Eucalyptus*. Aos dois e seis meses houve diferença significativa entre as toras de *Eucalyptus* e a madeira de *Pinus*, tanto na forma de toras como de costaneiras. Porém aos quatro meses de estocagem não houve diferença significativa entre os materiais analisados.

O *Eucalyptus* apresentou a maior variação nos diferentes tempos de estocagem, provavelmente muito mais em função de variações ocorridas durante o processo de coleta do que em função de alterações devidas à estocagem (GRÁFICO 3.7).

A costaneira de *Pinus* apresentou o menor teor de cinzas em todos os tempos analisados devido a menor proporção de casca em relação à madeira, em comparação com as toras de *Pinus*.



GRÁFICO 3.7 - VARIAÇÃO DO TEOR DE CINZAS DA MADEIRA COM CASCA, EM FUNÇÃO DA ESPÉCIE E DA FORMA E TAMANHO DA BIOMASSA FLORESTAL, EM DIFERENTES PERÍODOS DE ESTOCAGEM



FONTE: O autor

## 5 CONCLUSÕES

- a) A espécie que dá origem à biomassa florestal teve influência sobre a variação no teor de umidade, solubilizados em hidróxido de sódio, poder calorífico superior e inferior e teor de cinzas, não tendo influência somente sobre os solubilizados em água fria e água quente;
- b) O tamanho e forma da biomassa estocada tiveram influência sobre as variações ocorridas no teor de umidade, poder calorífico superior e inferior e solubilizados em água quente e hidróxido de sódio, não tendo influência sobre o teor de cinzas e nos solubilizados em água fria;
- c) a espécie que dá origem à biomassa foi mais importante que seu tamanho e forme nas propriedades de poder calorífico superior, solubilidade em hidróxido de sódio, e teor de cinzas, enquanto que o tamanho e forma da

biomassa foram mais importante para o teor de umidade; extrativos solúveis em água fria e quente e poder calorífico líquido;

- d) o material que teve melhor comportamento durante a estocagem foi a costaneira de *Pinus*, com melhor desempenho das propriedades de teor de umidade, poder calorífico superior e inferior e teor de cinzas;
- e) a costaneira foi também o material mais heterogêneo, em relação às variações ocorridas durante o tempo de estocagem;
- f) a costaneira foi o único material que iniciou o processo de degradação com seis meses de estocagem;
- g) as toras de *Pinus* com casca sofreram as menores alterações durante o período de estocagem, tendo ainda o pior comportamento, considerando o uso para a geração de energia;
- h) de forma geral, o tamanho e forma do material tiveram maior influência sobre o comportamento da biomassa na estocagem, que a espécie.

## 6 REFERÊNCIAS

ANTUNES, B. M.F.; ALMEIDA, E.D.L. Biomassa: Produção e planejamento de energia elétrica. Coimbra: Universidade de Coimbra, 2003. 23 p. Relatório técnico. Disponível em: <<http://thor.deec.uc.pt/~ppee/docs0203/biomassa.pdf>> Acesso em: 28.set. 2004.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Aspectos técnicos da utilização da madeira e carvão vegetal como combustíveis. In: Seminário de Abastecimento Energético Industrial com Recursos Florestais, 2., 1982, São Paulo. Anais...São Paulo: Governo do Estado de São Paulo, 1982. p. 101-137.

BROWNING, B.L. **The chemistry of wood**. New York, London: John Wiley & Sons. 1963. 689 p.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e. V. **DIN 51900**: Determining the gross calorific value of solid and liquid fuels using the bomb calorimeter, and calculation of net calorific value. Berlim, 2000.

EPAGRI. Estação meteorológica. Lages: Estação Experimental de Pesquisa Agropecuária de Lages. 2006.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood. Chemistry, Ultrastructure, reactions.** New York: de Gruyter, 1989. 613 p.

GARSTANG, J.; WEEKES, A.; POULTER, R.; BARTLETT, D. Identification and characterisation of factors affecting losses in the large-scale, non-ventilated bulkstorage of wood chips and development of best storage practices. FES B/W2/00716/RESP.DTI/Pub urn 02/1535, 2002. 116 p. Relatório técnico.

HILLEBRAND, K.; FLYKTMAN, M.; KALLIO, E. LEINONEN, A.; LINDH, T.; MARTTILA, M.; TIIHONEN, I. Production of multifuels on the terminal of peat production area. Jyväskylä Science Park. Project book, Part II, Peat and field biomass production. 1999.

JIRJIS, R. Effects of particle size and pile height on storage and fuel quality of comminuted *Salix viminalis*. Biomass and Bioenergy. v. 28, p. 193-201, 2005.

JIRJIS, R. Storage and drying of wood fuel. Biomass and Bioenergy. v. 9, issue 1-5, p. 181-190, 1995.

KLOCK, U.; MUÑIZ, G.I.B.; HERNANDEZ, J.A. Química da Madeira. **Série didática FUPEF.** 3 ed. Curitiba: FUPEF. 2006. 82 p.

MARTIN, F. M. Otros aprovechamientos forestales. Salamanca: Edita Fernando Martín Asín, 1997.

NURMI, J. Measurement and evaluation of wood fuel. Biomass and Bioenergy. v. 2, issue 1-6, p. 157-171. 1992.

NURMI, J. The effect of whole-tree storage on the fuelwood properties of short-rotation *Salix* crops. Biomass and Bioenergy. v. 8, issue 4, p. 245-249. 1995.

NURMI, J. The storage of logging residue for fuel. Biomass and Bioenergy. v. 17, issue 1, p. 41-47. 1999.

QUIRINO, W.F.; VALE, A.T.; ANDRADE, A.P.A.; ABREU, V.L.S.; AZEREDO, A.C.S. Poder calorífico da madeira e de resíduos lignocelulósicos. *Biomassa e Energia*. v. 1, n. 2. p. 173-182. 2004.

SJÖSTRÖM, E. **Wood chemistry. Fundamentals and applications**. 2 ed. Califórnia:Academic Press, 1993. 293 p.

Technical Association for the worldwide pulp, paper and converting industry. TAPPI standard Test Methods. **TAPPI 207**: Water solubility of wood. Atlanta. 1994a.

Technical Association for the worldwide pulp, paper and converting industry. TAPPI standard Test Methods. **TAPPI 211**: Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525°C. Atlanta. 1994b.

Technical Association for the worldwide pulp, paper and converting industry. TAPPI standard Test Methods. **TAPPI 212**: One percent sodium hydroxide solubility of wood and pulp. Atlanta. 1994c.

Technical Association for the worldwide pulp, paper and converting industry. TAPPI standard Test Methods. **TAPPI 257**: Sampling and preparing wood for analysis. Atlanta. 1994d.

Technical Association for the worldwide pulp, paper and converting industry. TAPPI standard Test Methods. **TAPPI 264**: Preparation of wood for chemical analysis (Including procedures of removal of extractive and determination of moisture content). Atlanta. 1994f.

THÖRNQVIST, T. Drying and storage of forest residues for energy production. *Biomass, England*, v. 7, p. 125-134, 1985.

THÖRNQVIST, T. Projekt storskalig säsongslagring av trädbraänsle – en sammanfattning av etapp 1. Large-scale seasonal storage of tree fuel project – summary of phase 1. Sweden: The Swedish University of Agricultural Sciences. Department of Forest Products, 1986. 50 p. Report n° 188.

THÖRNQVIST, T. Storing of forest residues and comminuted fuels from forest residues. In: Conference held by the International Energy Agency (IEA) – Forestry Energy Programme Group C – Storing, drying and internal handling of wood fuels, 1984, Denmark. Proceedings.... Denmark: Danish Institute of Forest Technology, 1984. p. 16 – 18.

THÖRNQVIST, T. Wood fuel storage in large piles – Mechanisms and risks of self-ignition. In: IEA/BE Conference Task III/Activity 6 and 7., 1988, Sweden. Proceedings... Sweden: Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Operational Efficiency, 1988. p. 193-198.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A estocagem da biomassa florestal é apenas uma das operações do sistema de pré-tratamento da biomassa para a geração de energia, que envolve atividades de coleta, classificação, tratamento, distribuição, estocagem, entre outras. Assim, a otimização do uso da biomassa florestal para a geração de energia deve começar desde a produção florestal. Ai deve-se considerar que não somente a produção de florestas energéticas é fonte de matéria-prima para as plantas geradoras de energia. O uso múltiplo da floresta, no qual ainda continuam sendo considerados apenas usos industriais de transformação mecânica e química tradicionais<sup>53</sup> precisa incluir o uso energético da biomassa, além dos resíduos que já são produzidos, e que não estão sendo destinados para este uso.

Além da floresta, o uso de resíduos industriais precisa ser melhor organizado, com a especialização de empresas ou dos usuários para a coleta, manuseio, tratamento e estocagem da biomassa florestal, visto que estes procedimentos permitem o aumento da eficiência energética durante a conversão da biomassa em energia.

Dentro deste contexto, a metodologia de análise utilizada nesta tese foi transformada em um procedimento de análise laboratorial, utilizado para o controle de qualidade mensal dos fornecedores de biomassa da planta de geração de energia instalada na região de estudo. Este procedimento tem auxiliado tanto produtores como usuários da biomassa a melhorar seus procedimentos de coleta, tratamento e uso deste material para a geração de energia.

Além disso, esta metodologia já foi empregada para a análise de resíduos com longo período de estocagem e em estudos de quantificação e qualificação de resíduos florestais, permitindo a obtenção de resultados confiáveis e subsidiando decisões para os procedimentos prévios a serem adotados para o uso da biomassa na geração de energia.

Outro fator importante que deve ser destacado é que a análise empregada neste trabalho, para a verificação da variação na composição química da madeira, foi de ordem quantitativa. Não foram realizadas análises qualitativas que demonstrassem

---

<sup>53</sup> serrados, painéis, construção civil e celulose e papel

quais eram os produtos das reações químicas, ocorridas durante a estocagem, principalmente as relativas aos extrativos da madeira. Portanto, este é um tema importante de análise para trabalhos futuros, inclusive para se alcançar níveis onde os processos de alterações químicas possam ser controlados para a melhoria da qualidade energética da biomassa.

Ainda neste sentido, análises dos componentes macromoleculares da madeira, como alterações na quantidade de celulose e lignina, e análises dos processos ligados diretamente à biodegradação devem ser mais bem exploradas em trabalhos futuros. Estas podem se constituir em importante ferramenta para o entendimento das complexas alterações ocorridas na biomassa, durante as diferentes fases da estocagem.

Este trabalho foi focado na estocagem de biomassa com maiores dimensões devido à possibilidade de melhor controle das alterações ocorridas durante o processo. Estes, no entanto, dão subsídios para o entendimento do que acontece com a estocagem de material com pequenas dimensões, como cavacos e serragem e resíduos florestais com dimensões intermediárias, como galhos, copas das árvores e folhas. Portanto, a continuidade de estudos, focando a estocagem de biomassa com menores dimensões, é fundamental. Isto porque, grande parte da biomassa utilizada na indústria, tanto na produção de celulose e papel quanto para a geração de energia, é empregada na forma de cavacos ou serragem.

De forma geral, na estocagem da biomassa florestal com grandes dimensões, o teor de umidade na base úmida foi influenciado pelo tempo de estocagem, época de colheita e estocagem e pela espécie e tamanho e forma do material. Esta é a propriedade mais importante na avaliação da biomassa e que tem influência direta sobre a energia útil para o sistema de geração de energia.

A composição química da madeira com casca foi afetada de forma mais direta pelo tempo e pela época de estocagem e em menor proporção pela espécie e tamanho e forma do material. O teor de cinzas, no entanto, foi afetado somente pela espécie que dá origem à biomassa, não sendo importante para a avaliação da biomassa de grandes dimensões, em processos de estocagem. Esta propriedade, por sua vez, seria muito importante na avaliação da estocagem de cavacos, devido aos níveis de contaminação das pilhas, normal neste tipo de material.

Além disso, a variação da porcentagem de casca na biomassa estocada varia ao longo do tempo e deve ser mais bem analisada em trabalhos futuros. Este material é perdido, principalmente pela queda da mesma durante a estocagem e manuseio que antecede o uso na geração de energia. A quantidade de casca tem influência direta sobre a variação no teor de umidade, poder calorífico e quantidade de extrativos presentes e perdidos durante os processos de estocagem, além de afetar a variação no teor de cinzas da biomassa. Estas variações são devidas à maior permeabilidade e composição química, diferenciada entre a casca e a madeira.

Outro aspecto que precisa ser melhor avaliado em trabalhos futuros é a análise da biomassa de forma separada, considerando somente a madeira e somente a casca, em comparação com os resultados obtidos neste trabalho. Um estudo desta natureza propiciaria a análise da influência de cada um destes dois componentes da biomassa, no comportamento da mesma frente à estocagem.

O poder calorífico superior foi somente influenciado pela espécie e o poder calorífico líquido teve o mesmo comportamento do teor de umidade, em função da estreita relação entre estas duas variáveis.

Quanto à estocagem de toras e costaneiras para a região de Lages, em Santa Catarina, o tempo de estocagem ideal foi de dois a quatro meses, sendo que a biomassa deve ser colhida na primavera ou saída do inverno e estocada durante os meses de verão para a otimização das propriedades da madeira, visando o uso energético.

De maneira geral, os aspectos mais importantes que devem ser analisados para a utilização da biomassa na produção de energia, desde sua geração até o consumo, são relativos: a) ao tipo de material que será utilizado, considerando sua origem, espécie e forma na qual a biomassa é produzida; b) aos valores de teor de umidade, devido a sua relação direta com a energia útil para os sistemas de geração de energia e o teor de cinzas, principalmente quando se trata de resíduo sem pré-tratamento, ou na forma de cavacos; c) a existência de práticas de coleta, classificação, estocagem e distribuição da biomassa para a planta de geração de energia.

Com relação a estes pontos, pode-se interferir na qualidade da biomassa através do estabelecimento de procedimentos de classificação das fontes fornecedoras da biomassa e de seus produtos; através de controle contínuo das propriedades físicas e



químicas da biomassa, antes da sua entrada na geração de energia e da realização efetiva das atividades de pré-tratamento, das quais faz parte a estocagem.

Portanto, está claro que a estocagem deve ser utilizada para a melhoria da qualidade da biomassa, e também para a organização do fornecimento da matéria-prima para as plantas geradoras de energia e para a organização do mercado fornecedor de resíduos.

## GLOSSÁRIO

**Teor de umidade na base úmida** - a umidade é a medida da quantidade de água livre na biomassa e que pode ser avaliada pela diferença entre os pesos de uma amostra, antes e logo após ser submetida à secagem (NOGUEIRA e LORA, 2003, p. 51)).

**Poder calorífico** - poder calorífico é a quantidade de energia liberada durante a combustão completa de uma unidade de massa ou de volume de combustível, tendo como unidade de medida a caloria, quilocaloria ou Joule por unidade de massa. O poder calorífico pode ser definido com poder calorífico superior, inferior e líquido.

**Poder calorífico superior (PCS)** - é determinado em bomba calorimétrica, onde toda energia gerada fica retida dentro do recipiente de combustão, sendo que a água formada durante o processo é condensada, representando assim a quantidade máxima de energia obtida de um combustível. Nos combustíveis que originam água nos produtos da combustão, além do poder calorífico superior, obtêm-se um poder calorífico inferior (PCI). Tanto o PCS quanto o PCI são calculados em base seca, ou seja, a 0% de umidade (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2005, p. 128).

**Poder calorífico inferior (PCI)** – é o valor obtido após ser descontada a energia consumida para evaporar a água formada durante o processo de combustão. Esta variável é influenciada pela porcentagem de hidrogênio contida no combustível (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2005, p. 128).

**Poder calorífico líquido (PCL)** - é a energia líquida ou útil, após ser descontada a energia consumida para a eliminação da umidade contida na biomassa florestal (LEHTOVAARA, 2004, p. 02). Esta unidade de medida energética é fundamental, pois quando trata-se de poder calorífico, o teor de umidade é um fator muito importante a ser destacado para o caso da madeira, pois o mesmo pode variar dentro de uma escala bastante ampla. Seu valor pode variar de 15 a 17% (base úmida) na madeira seca ao ar

durante vários meses, até 70% (base úmida) na madeira recém-cortada (BRITO e BARRICHELO, 1982, p. 105).

**Teor de cinzas** - o teor de cinzas da biomassa florestal representa a porcentagem de componentes minerais contidos no material através da agregação ao longo da vida do vegetal, ou por contaminação durante os processos de colheita, transporte e manuseio. As cinzas se constituem no resíduo após a combustão completa da biomassa.

**Solubilidade da madeira em água fria e água quente**— a solubilidade da madeira em água indica a quantidade percentual de extrativos solúveis neste solvente. Os extrativos removidos com água fria são constituídos pelos componentes inorgânico, taninos, gomas, açúcares e materiais que dão cor à madeira. Os extrativos removidos através da água quente são todos os anteriores, mais o amido (TAPPI, 1994a, p. 01).

**Solubilidade da madeira em hidróxido de sódio a concentração de 1 %** - a solução de álcali aquecido extrai carboidratos de baixo peso molecular, constituídos basicamente de polioses e celulose degradada. A solubilidade da madeira pode indicar o grau de degradação por fungos, calor, luz, oxidação, entre outros, sendo que na madeira degradada, a porcentagem de materiais solúveis em álcali aumenta (TAPPI, 1994c, p. 01).

## REFERÊNCIAS

- ANTUNES, B. M.F.; ALMEIDA, E.D.L. Biomassa: Produção e planejamento de energia elétrica. Coimbra: Universidade de Coimbra, 2003. 23 p. Relatório técnico. Disponível em: <<http://thor.deec.uc.pt/~ppee/docs0203/biomassa.pdf>> Acesso em: 28.set. 2004.
- BONDUELLE, A.; YAMAJI, F. M.; BORGES, C. C. Resíduo de pinus: uma fonte para novos produtos. Disponível em: <<http://www.remade.com.br>>. Acessado em: 28 set. 2004.
- BRAND, M. A.; NEVES, M. D. Levantamento da disponibilidade dos resíduos industriais e florestais de madeira e avaliação da variação de sua qualidade energética em função das condições climáticas anuais, na região de Lages - Santa Catarina. Lages: Universidade do Planalto Catarinense, 2005. Relatório técnico.
- BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Aspectos técnicos da utilização da madeira e carvão vegetal como combustíveis. In: Seminário de Abastecimento Energético Industrial com Recursos Florestais, 2., 1982, São Paulo. Anais...São Paulo: Governo do Estado de São Paulo, 1982. p. 101-137.
- BRITO, J.O. Madeira para energia: - a verdadeira realidade do uso de recursos florestais. Silvicultura. Ano XI. Edição especial. p. 188-193, 1986.
- BROWNING, B.L. **The chemistry of wood**. New York, London: John Wiley & Sons. 1963. 689 p.
- CONTO, A. J.; SCHAITZA, E. G.; HOEFLICH, V. A. Uso de serragem como fonte alternativa de energia. Workshop sul-americano sobre usos alternativos de resíduos de origem florestal e urbana. Curitiba, 1997. p. 171-174.
- CRUZ, P. T. A.; NOGUEIRA, M. M. **Oportunidades para o desenvolvimento da biomassa energética no Brasil**. In: Revista da Madeira, n. 82, jul. 2004.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e. V. **DIN 51900**: Determining the gross calorific value of solid and liquid fuels using the bomb calorimeter, and calculation of net calorific value. Berlim, 2000.

EPAGRI. Estação meteorológica. Lages: Estação Experimental de Pesquisa Agropecuária de Lages. 2006.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood. Chemistry, Ultrastructure, reactions.** New York: de Gruyter, 1989. 613 p.

GARSTANG, J.; WEEKES, A.; POULTER, R.; BARTLETT, D. Identification and characterisation of factors affecting losses in the large-scale, non-ventilated bulkstorage of wood chips and development of best storage practices. FES B/W2/00716/RESP.DTI/Pub urn 02/1535, 2002. 116 p. Relatório técnico.

HEDING, N. The critical moisture content. In: Conference held by the International Energy Agency (IEA) – Forestry Energy Programme Group C – Storing, drying and internal handling of wood fuels, 1984, Denmark. Proceedings.... Denmark: Danish Institute of Forest Technology, 1984. p. 6 – 11.

HILLEBRAND, K.; FLYKTMAN, M.; KALLIO, E. LEINONEN, A.; LINDH, T.; MARTTILA, M.; TIIHONEN, I. Production of multifuels on the terminal of peat production area. Jyväskylä Science Park. Project book, Part II, Peat and field biomass production. 1999.

JIRJIS, R. Effects of particle size and pile height on storage and fuel quality of comminuted *Salix viminalis*. Biomass and Bioenergy. v. 28, p. 193-201, 2005.

JIRJIS, R. Storage and drying of wood fuel. Biomass and Bioenergy. v. 9, issue 1-5, p. 181-190, 1995.

KLOCK, U.; MUÑIZ, G.I.B.; HERNANDEZ, J.A. Química da Madeira. **Série didática FUPEF**. 3 ed. Curitiba: FUPEF. 2006. 82 p.

LEHTOVAARA, J. Calorific value – Status of the standardisation. In: International Conference “Standardisation of solid biofuels, 6<sup>th</sup>-7<sup>th</sup> October, 2004, Leipzig, Germany. Anais eletrônicos... Disponível em: <<http://www.energetik-leipzig.de/BioNorm/conference.htm>> Acesso em: 10 out. 2005.

MARTIN, F. M. Otros aprovechamientos forestales. Salamanca: Edita Fernando Martín Asín, 1997.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Ministro (Silas Rondeau Cavalcante Silva). Balanço Energético Nacional 2005(ano base 2004). <<http://www.mme.gov.br>> Acesso em: 24 nov. 2005.

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. Dendroenergia: fundamentos e aplicações. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

NURMI, J. Longterm storage of fuel chips in large piles. *Folia Forestalis*. Nº 767, p. 1-18, Agosto 1990.

NURMI, J. Measurement and evaluation of wood fuel. *Biomass and Bioenergy*. v. 2, issue 1-6, p. 157-171. 1992.

NURMI, J. The effect of whole-tree storage on the fuelwood properties of short-rotation *Salix* crops. *Biomass and Bioenergy*. v. 8, issue 4, p. 245-249. 1995.

NURMI, J. The storage of logging residue for fuel. *Biomass and Bioenergy*. v. 17, issue 1, p. 41-47. 1999.

QUIRINO, W.F.; VALE, A.T.; ANDRADE, A.P.A.; ABREU, V.L.S.; AZEREDO, A.C.S. Poder calorífico da madeira e de resíduos lignocelulósicos. *Biomassa e Energia*. v. 1, n. 2. p. 173-182. 2004.

SJÖSTRÖM, E. **Wood chemistry. Fundamentals and applications**. 2 ed. Califórnia:Academic Press, 1993. 293 p.

Technical Association for the worldwide pulp, paper and converting industry. TAPPI standard Test Methods. **TAPPI 207**: Water solubility of wood. Atlanta. 1994a.

Technical Association for the worldwide pulp, paper and converting industry. TAPPI standard Test Methods. **TAPPI 211**: Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525°C. Atlanta. 1994b.

Technical Association for the worldwide pulp, paper and converting industry. TAPPI standard Test Methods. **TAPPI 212**: One percent sodium hydroxide solubility of wood and pulp. Atlanta. 1994c.

Technical Association for the worldwide pulp, paper and converting industry. TAPPI standard Test Methods. **TAPPI 257**: Sampling and preparing wood for analysis. Atlanta. 1994d.

Technical Association for the worldwide pulp, paper and converting industry. TAPPI standard Test Methods. **TAPPI 258**: Basic density and moisture content of pulpwood. Atlanta. 1994e.

Technical Association for the worldwide pulp, paper and converting industry. TAPPI standard Test Methods. **TAPPI 264**: Preparation of wood for chemical analysis (Including procedures of removal of extractive and determination of moisture content). Atlanta. 1994f.

TEIXEIRA, F. N.; LORA, E. E. S. Capítulo 2 - Suprimento energético para termelétricas. In: LORA, E. E. S.; NASCIMENTO, M. A. R. Geração termelétrica. Planejamento, projeto e operação. v. 1. Rio de Janeiro: Interciência, 2004. p. 31 – 86.

THÖRNQVIST, T. Drying and storage of forest residues for energy production. Biomass, England, v. 7, p. 125-134, 1985.

THÖRNQVIST, T. Energy change due to storage of logging residues. In: International conference on bioenergy, 1984, Göteborg. Proceedings...Sweden: Swedish University of Agricultural Sciences Department of Forest Products, 1984a. Research notes nº 152.

THÖRNQVIST, T. Projekt storskalig säsongslagring av trädbraänsle – en sammanfattning av etapp 1. Large-scale seasonal storage of tree fuel project – summary of phase 1. Sweden: The Swedish University of Agricultural Sciences. Department of Forest Products, 1986. 50 p. Report nº 188.

THÖRNQVIST, T. Storing of forest residues and comminuted fuels from forest residues. In: Conference held by the International Energy Agency (IEA) – Forestry Energy Programme Group C – Storing, drying and internal handling of wood fuels, 1984, Denmark. Proceedings.... Denmark: Danish Institute of Forest Technology, 1984b. p. 16 – 18.

THÖRNQVIST, T. Wood fuel storage in large piles – Mechanisms and risks of self-ignition. In: IEA/BE Conference Task III/Activity 6 and 7, 1988, Sweden. Proceedings... Sweden: Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Operational Efficiency, 1988. p. 193-198.

VLASSOV, D. Combustíveis, combustão e câmaras de combustão. Curitiba: Editora da UFPR, 2001.



## APÊNDICE I – FOTOS DO LOCAL DO EXPERIMENTO

FIGURA 1 – MONTAGEM DAS PILHAS DE BIOMASSA FLORESTAL PARA O EXPERIMENTO (LOTE 1) – PÁTIO DA EMPRESA BATTISTELLA INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA., LAGES –SC (18/10/2003)



FONTE: O autor

FIGURA 2 – DISPOSIÇÃO DA PILHAS DE BIOMASSA FLORESTAL (LOTE 1) – PÁTIO DA EMPRESA BATTISTELLA INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA, LAGES – SC (18/10/2003)



FONTE: O autor

FIGURA 3 – ASPECTO DA PILHA DE TORAS DE *Pinus taeda* UTILIZADA NO EXPERIMENTO - PÁTIO DA EMPRESA BATTISTELLA INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA, LAGES – SC (18/10/2003)



FONTE: O autor

FIGURA 4 - ASPECTO DA PILHA DE TORAS DE *Eucalyptus dunnii* UTILIZADA NO EXPERIMENTO - PÁTIO DA EMPRESA BATTISTELLA INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA, LAGES – SC (18/10/2003)



FONTE: O autor



FIGURA 5 - ASPECTO DA PILHA DE COSTANEIRAS DE *Pinus* SPP. UTILIZADA NO EXPERIMENTO - PÁTIO DA EMPRESA BATTISTELLA INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA, LAGES – SC (18/10/2003)



FONTE: O autor

FIGURA 6 – ASPECTO GERAL DA DISPOSIÇÃO DAS PILHAS DE TRÊS LOTES– PÁTIO DA EMPRESA BATTISTELLA INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA., LAGES –SC (05/05/2004)



FONTE: O autor

APÊNDICE 2 – ANÁLISES ESTATÍSTICAS DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS  
EXPERIMENTOS

TABELA 1.3 - TESTE F PARA O TEOR DE UMIDADE NA BASE ÚMIDA EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ESTOCAGEM

DF EFFECT	MS EFFECT	DF ERROR	MS ERROR	F	P-LEVEL
3	3205,394	128	148,55357	21,5774	2,24907E-11

FONTE: O autor

TABELA 1.4 – VARIAÇÃO NO TEOR DE UMIDADE NA BASE ÚMIDA DA BIOMASSA FLORESTAL EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ESTOCAGEM (TESTE DE MÉDIAS DE TUKEY).

TEMPO DE ESTOCAGEM	RECÉM-COLETADO	2 MESES	4 MESES	6 MESES
Recém-coletado		0,000712	7,689E-06	7,689E-06
2 meses	0,000712		0,0010476	0,1409052
4 meses	0,000008	0,001048		0,3742925
6 meses	0,000008	0,140905	0,3742925	
Média (TU %)	56a	44b	33c	38bc
Mínimo (TU %)	46	14	12	22
Máximo (TU %)	65	64	58	57
Desvio padrão	4,57	14,60	15,01	11,60

FONTE: O autor

NOTA: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente

TABELA 1.5 - TESTE F PARA A SOLUBILIDADE DA MADEIRA COM CASCA EM ÁGUA FRIA EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ESTOCAGEM

DF EFFECT	MS EFFECT	DF ERROR	MS ERROR	F	P-LEVEL
3	24,3489	128	0,9115	26,7142	1,748E-13

FONTE: O autor

TABELA 1.6 – VARIAÇÃO DA SOLUBILIDADE DA MADEIRA COM CASCA EM ÁGUA FRIA EM RELAÇÃO AO TEMPO DE ESTOCAGEM DA BIOMASSA FLORESTAL (TESTE DE MÉDIAS DE TUKEY).

TEMPO DE ESTOCAGEM	RECÉM-COLETADO	2 MESES	4 MESES	6 MESES
Recém-coletado		0,00002	0,08894	0,00346
2 meses	0,00002		0,00001	0,00001
4 meses	0,08894	0,00001		0,69959
6 meses	0,00346	0,00001	0,69959	
Média (%)	2,55b	3,68a	2,00bc	1,74c
Mínimo (%)	0,84	2,39	0,50	0,36
Máximo (%)	3,77	6,03	3,09	3,57
Desvio padrão	0,80	1,09	0,89	1,02

FONTE: O autor

NOTA: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey P &gt; 0,05).

TABELA 1.7 - TESTE F PARA A SOLUBILIDADE DA MADEIRA COM CASCA EM ÁGUA QUENTE EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ESTOCAGEM

DF EFFECT	MS EFFECT	DF ERROR	MS ERROR	F	P-LEVEL
3	10,6223	128	1,8721	5,6740	0,0011

FONTE: O autor

TABELA 1.8 – VARIAÇÃO DA SOLUBILIDADE DA MADEIRA COM CASCA EM ÁGUA QUENTE EM RELAÇÃO AO TEMPO DE ESTOCAGEM DA BIOMASSA FLORESTAL (TESTE DE MÉDIAS DE TUKEY).

TEMPO DE ESTOCAGEM	RECÉM-COLETADO	2 MESES	4 MESES	6 MESES
Recém-coletado		0,0199	0,9807	0,8387
2 meses	0,0199		0,0058	0,0011
4 meses	0,9807	0,0058		0,9699
6 meses	0,8387	0,0011	0,9699	
Média (%)	3,24b	4,22a	3,11b	2,96b
Mínimo (%)	1,21	2,06	1,08	0,64
Máximo (%)	5,37	7,46	4,79	5,78
Desvio padrão	1,16	1,42	1,11	1,70

FONTE: O autor

NOTA: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

TABELA 1.9 - TESTE F PARA A SOLUBILIDADE DA MADEIRA COM CASCA EM HIDRÓXIDO DE SÓDIO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ESTOCAGEM

DF EFFECT	MS EFFECT	DF ERROR	MS ERROR	F	P-LEVEL
3	36,4200	128	6,8800	5,2936	0,0018

FONTE: O autor

TABELA 1.10 – VARIAÇÃO DA SOLUBILIDADE DA MADEIRA COM CASCA EM HIDRÓXIDO DE SÓDIO EM RELAÇÃO AO TEMPO DE ESTOCAGEM DA BIOMASSA FLORESTAL (TESTE DE MÉDIAS DE TUKEY).

TEMPO DE ESTOCAGEM	RECÉM-COLETADO	2 MESES	4 MESES	6 MESES
Recém-coletado		0,0062	0,0031	0,0151
2 meses	0,0062		0,9974	0,9928
4 meses	0,0031	0,9974		0,9662
6 meses	0,0151	0,9928	0,9662	
Média (%)	14,56a	12,46b	12,34b	12,64b
Mínimo (%)	9,91	9,09	8,87	7,73
Máximo (%)	18,30	18,87	16,28	17,01
Desvio padrão	2,88	2,84	2,16	2,54

FONTE: O autor

NOTA: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

TABELA 1.11 - TESTE F PARA O PODER CALORÍFICO SUPERIOR EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ESTOCAGEM

DF EFFECT	MS EFFECT	DF ERROR	MS ERROR	F	P-LEVEL
3	17406,79	128	13391,22	1,299865	0,277406

FONTE: O autor

TABELA 1.12 – VARIAÇÃO NO PODER CALORÍFICO SUPERIOR EM RELAÇÃO AO TEMPO DE ESTOCAGEM DA BIOMASSA FLORESTAL (TESTE DE MÉDIAS DE TUKEY).

TEMPO DE ESTOCAGEM	RECÉM-COLETADO	2 MESES	4 MESES	6 MESES
Recém-coletado		0,4350	0,5446	0,2562
2 meses	0,4350		0,9981	0,9873
4 meses	0,5446	0,9981		0,9572
6 meses	0,2562	0,9873	0,9572	
Média (kcal/kg)	4686a	4729a	4724a	4739a
Mínimo (kcal/kg)	4462	4545	4549	4517
Máximo (kcal/kg)	4927	4887	4887	4911
Desvio padrão	123,21	102,02	116,14	120,36

FONTE: O autor

NOTA: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

TABELA 1.13 - TESTE F PARA O PODER CALORÍFICO LÍQUIDO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ESTOCAGEM

DF EFFECT	MS EFFECT	DF ERROR	MS ERROR	F	P-LEVEL
3	8135720	128	370554,2	21,9555	1,55E-11

FONTE: O autor

TABELA 1.14 – VARIAÇÃO NO PODER CALORÍFICO LÍQUIDO EM RELAÇÃO AO TEMPO DE ESTOCAGEM DA BIOMASSA FLORESTAL (TESTE DE MÉDIAS DE TUKEY).

TEMPO DE ESTOCAGEM	RECÉM-COLETADO	2 MESES	4 MESES	6 MESES
Recém-coletado		0,00056	0,00001	0,00001
2 meses	0,00056		0,00112	0,12771
4 meses	0,00001	0,00112		0,40988
6 meses	0,00001	0,12771	0,40988	
Média (kcal/kg)	1611c	2197b	2756a	2524ab
Mínimo (kcal/kg)	1195	1269	1600	1672
Máximo (kcal/kg)	2068	3798	3733	3379
Desvio padrão	227,72	740,82	733,85	585,67

FONTE: O autor

NOTA: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

TABELA 1.15 - TESTE F PARA O TEOR DE CINZAS DA MADEIRA COM CASCA EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ESTOCAGEM

DF EFFECT	MS EFFECT	DF ERROR	MS ERROR	F	P-LEVEL
3	0,1761	128	0,1156	1,5231	0,2117

FONTE: O autor



TABELA 1.16 – VARIAÇÃO DO O TEOR DE CINZAS DA MADEIRA COM CASCA EM RELAÇÃO AO TEMPO DE ESTOCAGEM DA BIOMASSA FLORESTAL (TESTE DE MÉDIAS DE TUKEY).

TEMPO DE ESTOCAGEM	RECÉM-COLETADO	2 MESES	4 MESES	6 MESES
Recém-coletado		0,8561	0,7219	0,8579
2 meses	0,8561		0,2531	1,0000
4 meses	0,7219	0,2531		0,2549
6 meses	0,8579	1,0000	0,2549	
Média (%)	0,54a	0,60a	0,45a	0,60a
Mínimo (%)	0,26	0,25	0,23	0,26
Máximo (%)	1,05	1,90	0,70	1,98
Desvio padrão	0,22	0,45	0,14	0,44

FONTE: O autor

NOTA: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

TABELA 2.3 – TESTE F PARA O TEOR DE UMIDADE NA BASE ÚMIDA EM FUNÇÃO DA ÉPOCA DE COLHEITA

DF EFFECT	MS EFFECT	DF ERROR	MS ERROR	F	P-LEVEL
3	100,6701	29	12,6223	7,9756	0,0005

FONTE: O autor

TABELA 2.4 – VARIAÇÃO NO TEOR DE UMIDADE NA BASE ÚMIDA EM RELAÇÃO À ÉPOCA DE COLHEITA DA BIOMASSA FLORESTAL (TESTE DE MÉDIAS DE TUKEY).

ÉPOCA DE COLHEITA	OUTUBRO	JANEIRO	MAIO	AGOSTO
Outubro		0,9999	0,0016	0,0290
Janeiro	0,9999		0,0057	0,0674
Maio	0,0016	0,0057		0,6494
Agosto	0,0290	0,0674	0,6494	
Média TU (%)	52c	53bc	59a	57ab
Mínimo TU (%)	46	49	55	53
Máximo TU (%)	57	56	65	62
Desvio Padrão	3,28	2,79	4,11	3,64

FONTE: O autor

NOTA: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

TABELA 2.5 – TESTE F PARA A SOLUBILIDADE DA MADEIRA EM ÁGUA FRIA EM FUNÇÃO DA ÉPOCA DE COLHEITA

DF EFFECT	MS EFFECT	DF ERROR	MS ERROR	F	P-LEVEL
3	1,122167	29	0,583216	1,9241	0,147742

FONTE: O autor

TABELA 2.6 - VARIAÇÃO DA SOLUBILIDADE EM ÁGUA FRIA DA BIOMASSA FLORESTAL, EM RELAÇÃO À ÉPOCA DE COLHEITA (TESTE DE MÉDIAS DE TUKEY).

ÉPOCA DE COLHEITA	OUTUBRO	JANEIRO	MAIO	AGOSTO
Outubro		0,983207	0,927738	0,132391
Janeiro	0,983207		0,997844	0,36606
Maio	0,927738	0,997844		0,37071
Agosto	0,132391	0,36606	0,37071	
Média (%)	2,85a	2,71a	2,63a	2,04a
Mínimo (%)	2,05	2,46	1,93	0,84
Máximo (%)	3,77	2,94	3,57	3,57
Desvio Padrão	0,66	0,15	0,63	1,12

FONTE: O autor

NOTA: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

TABELA 2.7 – TESTE F PARA A SOLUBILIDADE EM ÁGUA QUENTE DA BIOMASSA FLORESTAL EM FUNÇÃO DA ÉPOCA DE COLHEITA

DF EFFECT	MS EFFECT	DF ERROR	MS ERROR	F	P-LEVEL
3	3,328843	29	1,129566	2,94701	0,049325

FONTE: O autor

TABELA 2.8 - VARIAÇÃO DA SOLUBILIDADE EM ÁGUA QUENTE DA BIOMASSA FLORESTAL, EM RELAÇÃO À ÉPOCA DE COLHEITA (TESTE DE MÉDIAS DE TUKEY).

ÉPOCA DE COLHEITA	OUTUBRO	JANEIRO	MAIO	AGOSTO
Outubro		0,9964	0,0825	0,5053
Janeiro	0,9964		0,0907	0,4648
Maio	0,0825	0,0907		0,7012
Agosto	0,5053	0,4648	0,7012	
Média (%)	3,75a	3,87a	2,50a	3,05a
Mínimo (%)	2,42	3,37	1,21	2,00
Máximo (%)	5,37	4,29	3,93	4,74
Desvio Padrão	1,24	0,38	1,00	1,21

FONTE: O autor

NOTA: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

TABELA 2.9 – TESTE F PARA A SOLUBILIDADE EM HIDRÓXIDO DE SÓDIO EM FUNÇÃO DA ÉPOCA DE COLHEITA

DF EFFECT	MS EFFECT	DF ERROR	MS ERROR	F	P-LEVEL
3	42,29766	29	4,799983	8,812045	0,000262

FONTE: O autor

TABELA 2.10 – VARIAÇÃO NA SOLUBILIDADE EM HIDRÓXIDO DE SÓDIO DA BIOMASSA FLORESTAL, EM RELAÇÃO À ÉPOCA DE COLHEITA (TESTE DE MÉDIAS DE TUKEY).

ÉPOCA DE COLHEITA	OUTUBRO	JANEIRO	MAIO	AGOSTO
Outubro		0,9288	0,0028	0,0014
Janeiro	0,9288		0,0346	0,0190
Maio	0,0028	0,0346		0,9917
Agosto	0,0014	0,0190	0,9917	
Média (%)	16,98a	16,27a	12,94b	12,64b
Mínimo (%)	15,33	15,16	9,91	10,13
Máximo (%)	18,30	17,27	15,91	17,06
Desvio Padrão	1,01	0,92	2,44	3,15

FONTE: O autor

NOTA: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

TABELA 2.11 – TESTE F PARA O PODER CALORÍFICO SUPERIOR EM FUNÇÃO DA ÉPOCA DE COLHEITA

DF EFFECT	MS EFFECT	DF ERROR	MS ERROR	F	P-LEVEL
3	4580,391	29	16277,93	0,281387	0,838384

FONTE: O autor

TABELA 2.12 - VARIAÇÃO NO PODER CALORÍFICO SUPERIOR DA BIOMASSA FLORESTAL, EM RELAÇÃO À ÉPOCA DE COLHEITA

ÉPOCA DE COLHEITA	OUTUBRO	JANEIRO	MAIO	AGOSTO
Outubro		0,9906	0,9767	0,9357
Janeiro	0,9906		0,9097	0,8432
Maio	0,9767	0,9097		0,9980
Agosto	0,9357	0,8432	0,9980	
Média (kcal/kg)	4699a	4719a	4674a	4664a
Mínimo (kcal/kg)	4462	4543	4534	4517
Máximo (kcal/kg)	4827	4927	4782	4741
Desvio Padrão	156,45	167,45	101,62	81,73

FONTE: O autor

NOTA: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

TABELA 2.13 – TESTE F PARA O PODER CALORÍFICO LÍQUIDO EM FUNÇÃO DA ÉPOCA DE COLHEITA

DF EFFECT	MS EFFECT	DF ERROR	MS ERROR	F	P-LEVEL
3	284893,3	29	27751,21	10,26598	9,02638E-05

FONTE: O autor

TABELA 2.14 - VARIAÇÃO NO PODER CALORÍFICO LÍQUIDO DA BIOMASSA FLORESTAL, EM RELAÇÃO À ÉPOCA DE COLHEITA (TESTE DE MÉDIAS DE TUKEY).

ÉPOCA DE COLHEITA	OUTUBRO	JANEIRO	MAIO	AGOSTO
Outubro		0,9976	0,0005	0,0075
Janeiro	0,9976		0,0022	0,0291
Maio	0,0005	0,0022		0,6544
Agosto	0,0075	0,0291	0,6544	
Média (kcal/kg)	1790a	1774a	1422b	1513b
Mínimo (kcal/kg)	1641	1692	1195	1333
Máximo (kcal/kg)	2068	1842	1651	1697
Desvio Padrão	200,71	62,72	191,05	146,14

FONTE: O autor

NOTA: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

TABELA 2.15 – TESTE F PARA O TEOR DE CINZAS DA BIOMASSA FLORESTAL EM FUNÇÃO DA ÉPOCA DE COLHEITA

DF EFFECT	MS EFFECT	DF ERROR	MS ERROR	F	P-LEVEL
3	0,019523	29	0,052409	0,372518	0,773421

FONTE: O autor

TABELA 2.16 – VARIAÇÃO DO TEOR DE CINZAS DA BIOMASSA FLORESTAL, EM RELAÇÃO À ÉPOCA DE COLHEITA

ÉPOCA DE COLHEITA	OUTUBRO	JANEIRO	MAIO	AGOSTO
Outubro		0,996967	0,895082	0,768813
Janeiro	0,996967		0,973937	0,911001
Maio	0,895082	0,973937		0,993457
Agosto	0,768813	0,911001	0,993457	
Média (%)	0,59a	0,57a	0,51a	0,49a
Mínimo (%)	0,34	0,55	0,37	0,26
Máximo (%)	1,05	0,59	0,70	0,87
Desvio Padrão	0,32	0,02	0,14	0,27

FONTE: O autor

NOTA: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

TABELA 2.17 - TESTE F PARA O TEOR DE UMIDADE NA BASE ÚMIDA DA BIOMASSA FLORESTAL EM FUNÇÃO DA ÉPOCA DE ESTOCAGEM

DF EFFECT	MS EFFECT	DF ERROR	MS ERROR	F	P-LEVEL
3	1013,2791	128	199,9313	5,0681	0,0024

FONTE: O autor

TABELA 2.18 - VARIAÇÃO NO TEOR DE UMIDADE NA BASE ÚMIDA DA BIOMASSA FLORESTAL EM RELAÇÃO À ÉPOCA DE ESTOCAGEM (TESTE DE MÉDIAS DE TUKEY).

ÉPOCA DE ESTOCAGEM	OUTUBRO A MAIO	JANEIRO A AGOSTO	MAIO A NOVEMBRO	AGOSTO A FEVEREIRO
Outubro a maio		0,0526	0,0248	0,9994
Janeiro a agosto	0,0526		1,0000	0,0398
Maio a novembro	0,0248	1,0000		0,0175
Agosto a Fevereiro	0,9994	0,0398	0,0175	
Média (TU %)	39bc	48ac	48a	38c
Mínimo (TU %)	14	37	17	12
Máximo (TU %)	63	57	65	62
Desvio padrão	15,11	7,36	13,94	16,52

FONTE: O autor

NOTA: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

TABELA 2.20 - TESTE F PARA A SOLUBILIDADE EM ÁGUA FRIA DA BIOMASSA FLORESTAL EM FUNÇÃO DA ÉPOCA DE ESTOCAGEM

DF EFFECT	MS EFFECT	DF ERROR	MS ERROR	F	P-LEVEL
3	4,358828	128	1,379981	3,158615	0,027029

FONTE: O autor

TABELA 2.21 – VARIAÇÃO NA SOLUBILIDADE EM ÁGUA FRIA DA BIOMASSA FLORESTAL EM RELAÇÃO À ÉPOCA DE ESTOCAGEM (TESTE DE MÉDIAS DE TUKEY).

ÉPOCA DE ESTOCAGEM	OUTUBRO A MAIO	JANEIRO A AGOSTO	MAIO A NOVEMBRO	AGOSTO A FEVEREIRO
Outubro a maio		0,9871	0,9481	0,1196
Janeiro a agosto	0,9871		0,9987	0,0949
Maio a novembro	0,9481	0,9987		0,0297
Agosto a Fevereiro	0,1196	0,0949	0,0297	
Média (%)	2,60ab	2,70ab	2,75a	1,98b
Mínimo (%)	0,43	0,52	0,36	0,67
Máximo (%)	6,03	3,57	6,01	3,57
Desvio padrão	1,39	0,90	1,28	0,98

FONTE: O autor

NOTA: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

TABELA 2.23 - TESTE F PARA A SOLUBILIDADE EM ÁGUA QUENTE DA BIOMASSA FLORESTAL EM FUNÇÃO DA ÉPOCA DE ESTOCAGEM

DF EFFECT	MS EFFECT	DF ERROR	MS ERROR	F	P-LEVEL
3	9,204122	128	1,905364	4,830636	0,003218

FONTE: O autor

TABELA 2.24 – VARIAÇÃO NA SOLUBILIDADE EM ÁGUA QUENTE DA BIOMASSA FLORESTAL EM RELAÇÃO À ÉPOCA DE ESTOCAGEM DA BIOMASSA FLORESTAL (TESTE DE MÉDIAS DE TUKEY).

ÉPOCA DE ESTOCAGEM	OUTUBRO A MAIO	JANEIRO A AGOSTO	MAIO A NOVEMBRO	AGOSTO A FEVEREIRO
Outubro a maio		0,1785	0,0159	0,0022
Janeiro a agosto	0,1785		0,9232	0,6600
Maio a novembro	0,0159	0,9232		0,9378
Agosto a Fevereiro	0,0022	0,6600	0,9378	
Média (%)	4,09a	3,36ab	3,13b	2,94b
Mínimo (%)	1,74	0,64	0,96	1,08
Máximo (%)	7,46	4,74	6,21	5,78
Desvio padrão	1,48	1,19	1,40	1,37

FONTE: O autor

NOTA: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

TABELA 2.26 - TESTE F PARA A SOLUBILIDADE EM HIDRÓXIDO DE SÓDIO DA BIOMASSA FLORESTAL EM FUNÇÃO DA ÉPOCA DE ESTOCAGEM

DF EFFECT	MS EFFECT	DF ERROR	MS ERROR	F	P-LEVEL
3	100,0807	128	5,3880	18,5749	4,5839E-10

FONTE: O autor

TABELA 2.27 – VARIAÇÃO NA SOLUBILIDADE EM HIDRÓXIDO DE SÓDIO DA BIOMASSA FLORESTAL EM RELAÇÃO À ÉPOCA DE ESTOCAGEM (TESTE DE MÉDIAS DE TUKEY).

ÉPOCA DE ESTOCAGEM	OUTUBRO A MAIO	JANEIRO A AGOSTO	MAIO A NOVEMBRO	AGOSTO A FEVEREIRO
Outubro a maio		2,563E-05	7,689E-06	7,868E-06
Janeiro a agosto	2,563E-05		3,793E-01	9,897E-01
Maio a novembro	7,689E-06	3,793E-01		4,739E-01
Agosto a Fevereiro	7,868E-06	9,897E-01	4,739E-01	
Média (%)	15,39a	12,54b	11,56b	12,35b
Mínimo (%)	12,10	9,09	7,73	8,87
Máximo (%)	18,87	17,27	15,91	17,06
Desvio padrão	2,00	2,62	2,07	2,63

FONTE: O autor

NOTA: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

TABELA 2.29 - TESTE F PARA O PODER CALORÍFICO SUPERIOR DA BIOMASSA FLORESTAL EM FUNÇÃO DA ÉPOCA DE ESTOCAGEM

DF EFFECT	MS EFFECT	DF ERROR	MS ERROR	F	P-LEVEL
3	15142,2852	128	13444,3	1,1263	0,3410

FONTE: O autor

TABELA 2.30 – VARIAÇÃO NO PODER CALORÍFICO SUPERIOR DA BIOMASSA FLORESTAL EM RELAÇÃO À ÉPOCA DE ESTOCAGEM (TESTE DE MÉDIAS DE TUKEY).

ÉPOCA DE ESTOCAGEM	OUTUBRO A MAIO	JANEIRO A AGOSTO	MAIO A NOVEMBRO	AGOSTO A FEVEREIRO
Outubro a maio		0,8952	0,7696	0,7929
Janeiro a agosto	0,8952		0,3973	0,4196
Maio a novembro	0,7696	0,3973		1,0000
Agosto a Fevereiro	0,7929	0,4196	1,0000	
Média (kcal/kg)	4709a	4688a	4736a	4735a
Mínimo (kcal/kg)	4462	4521	4534	4517
Máximo (kcal/kg)	4876	4927	4887	4911
Desvio padrão	127,90	122,62	104,59	109,49

FONTE: O autor

NOTA: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

TABELA 2.32 - TESTE F PARA O PODER CALORÍFICO INFERIOR DA BIOMASSA FLORESTAL EM FUNÇÃO DA ÉPOCA DE ESTOCAGEM

DF EFFECT	MS EFFECT	DF ERROR	MS ERROR	F	P-LEVEL
3	2660310	128	498884,2	5,3325	0,0017

FONTE: O autor

TABELA 2.33 – VARIAÇÃO NO PODER CALORÍFICO LÍQUIDO DA BIOMASSA FLORESTAL EM RELAÇÃO À ÉPOCA DE ESTOCAGEM (TESTE DE MÉDIAS DE TUKEY).

ÉPOCA DE ESTOCAGEM	OUTUBRO A MAIO	JANEIRO A AGOSTO	MAIO A NOVEMBRO	AGOSTO A FEVEREIRO
Outubro a maio		0,0314	0,0291	0,9988
Janeiro a agosto	0,0314		0,9935	0,0213
Maio a novembro	0,0291	0,9935		0,0188
Agosto a Fevereiro	0,9988	0,0213	0,0188	
Média (kcal/kg)	2483a	1974b	2023b	2508a
Mínimo (kcal/kg)	1348	1649	1195	1333
Máximo (kcal/kg)	3733	2400	3638	3798
Desvio padrão	767,47	299,99	706,91	822,57

FONTE: O autor

NOTA: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

TABELA 2.35 - TESTE F PARA O TEOR DE CINZAS DA BIOMASSA FLORESTAL EM FUNÇÃO DA ÉPOCA DE ESTOCAGEM

DF EFFECT	MS EFFECT	DF ERROR	MS ERROR	F	P-LEVEL
3	0,201201	128	0,115021	1,749262	0,160242

FONTE: O autor

TABELA 2.36 – VARIAÇÃO NO TEOR DE CINZAS DA BIOMASSA FLORESTAL EM RELAÇÃO À ÉPOCA DE ESTOCAGEM (TESTE DE MÉDIAS DE TUKEY).

ÉPOCA DE ESTOCAGEM	OUTUBRO A MAIO	JANEIRO A AGOSTO	MAIO A NOVEMBRO	AGOSTO A FEVEREIRO
Outubro a maio		0,984859	0,929578	0,435685
Janeiro a agosto	0,984859		0,997558	0,324797
Maio a novembro	0,929578	0,997558		0,149545
Agosto a Fevereiro	0,435685	0,324797	0,149545	
Média (%)	0,53a	0,50a	0,49a	0,65a
Mínimo (%)	0,34	0,38	0,23	0,26
Máximo (%)	1,05	0,60	0,83	1,98
Desvio padrão	0,22	0,07	0,20	0,57

FONTE: O autor

NOTA: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

TABELA 3.3 - TESTE F PARA O TEOR DE UMIDADE NA BASE ÚMIDA DA MADEIRA COM CASCA EM FUNÇÃO DA ESPÉCIE E DO TAMANHO E FORMA DA BIOMASSA FLORESTAL

DF EFFECT	MS EFFECT	DF ERROR	MS ERROR	F	P-LEVEL
2	5259,174	129	140,4085	37,4562	1,492E-13

FONTE: O autor

TABELA 3.4 – VARIAÇÃO DO O TEOR DE UMIDADE NA BASE ÚMIDA DA MADEIRA EM FUNÇÃO DA ESPÉCIE E E DO TAMANHO E FORMA DA BIOMASSA FLORESTAL (TESTE DE MÉDIAS DE TUKEY).

TIPO E GRANULOMETRIA DA BIOMASSA	<i>Pinus</i> COM CASCA	<i>Eucalyptus</i> COM CASCA	COSTANEIRA DE <i>Pinus</i>
<i>Pinus</i> com casca		0,00002	0,00002
<i>Eucalyptus</i> com casca	0,00002		0,00112
Costaneira de <i>Pinus</i>	0,00002	0,00112	
Média (%)	53a	41b	31c
Mínimo (%)	24	27	12
Máximo (%)	65	59	58
Desvio padrão	9,41	9,81	16,41

FONTE: O autor

NOTA: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

TABELA 3.6 - TESTE F PARA O TEOR DE UMIDADE NA BASE ÚMIDA DA MADEIRA COM CASCA DE DIFERENTES ESPÉCIES E DO TAMANHO E FORMA DA BIOMASSA FLORESTAL, EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ESTOCAGEM

VARIÁVEL	DF EFFECT	MS EFFECT	DF ERROR	MS ERROR	F	P-LEVEL
Tempo	3	3479,9	6	447,13	7,7828	0,017
Material	2	5259,2	6	447,13	11,7622	0,008
Tempo e material	6	447,1	120	48,45	9,2290	2,63E-08

FONTE: O autor



TABELA 3.7 – VARIAÇÃO DO O TEOR DE UMIDADE NA BASE ÚMIDA DA MADEIRA COM CASCA DE DIFERENTES ESPÉCIES E DO TAMANHO E FORMA DA BIOMASSA FLORESTAL, EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ESTOCAGEM (TESTE DE MÉDIAS DE TUKEY).

TIPO/FORMA X TEMPO	RC X PCC	RC X ECC	RC X C
Recém-coletado x PCC		0,7112	0,8659
Recém-coletado x ECC	0,7112		1,0000
Recém-coletado x C	0,8659	1,0000	
Média (%)	59a	54a	54a
TIPO/FORMA X TEMPO	DOIS MESES X PCC	DOIS MESES X ECC	DOIS MESES X C
Dois meses x PCC		0,0001	0,0001
Dois meses x ECC	0,0001		0,0006
Dois meses x C	0,0001	0,0006	
Média (%)	58a	43b	28c
TIPO/FORMA X TEMPO	QUATRO MESES X PCC	QUATRO MESES X ECC	QUATRO MESES X C
Quatro meses x PCC		0,0070	0,0001
Quatro meses x ECC	0,0070		0,0001
Quatro meses x C	0,0001	0,0001	
Média (%)	46a	34b	15c
TIPO/FORMA X TEMPO	SEIS MESES X PCC	SEIS MESES X ECC	SEIS MESES X C
Seis meses x PCC		0,0001	0,0001
Seis meses x ECC	0,0001		0,9900
Seis meses x C	0,0001	0,9900	
Média (%)	51a	32b	28b

FONTE: O autor

NOTAS: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

PCC = *Pinus* com casca; ECC = *Eucalyptus* com casca; C = costaneira de *Pinus*; RC = recém-coletado

TABELA 3.8 - TESTE F PARA A SOLUBILIDADE DA MADEIRA COM CASCA EM ÁGUA FRIA EM FUNÇÃO DA ESPÉCIE E DO TAMANHO E FORMA DA BIOMASSA FLORESTAL

DF EFFECT	MS EFFECT	DF ERROR	MS ERROR	F	P-LEVEL
2	3,0391	129	1,4235	2,1349	0,1224

FONTE: O autor

TABELA 3.9 – VARIAÇÃO A SOLUBILIDADE DA MADEIRA COM CASCA EM ÁGUA FRIA EM FUNÇÃO DA ESPÉCIE E DO TAMANHO E FORMA DA BIOMASSA FLORESTAL (TESTE DE MÉDIAS DE TUKEY).

TIPO E GRANULOMETRIA DA BIOMASSA	<i>Pinus</i> COM CASCA	<i>Eucalyptus</i> COM CASCA	COSTANEIRA DE <i>Pinus</i>
<i>Pinus</i> com casca		0,1011	0,7640
<i>Eucalyptus</i> com casca	0,1011		0,4554
Costaneira de <i>Pinus</i>	0,7640	0,4554	
Média (%)	2,26a	2,76a	2,44a
Mínimo (%)	0,43	1,12	0,36
Máximo (%)	3,57	6,03	6,01
Desvio padrão	1,10	1,16	1,35

FONTE: O autor

NOTA: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

TABELA 3.11 - TESTE F PARA A SOLUBILIDADE DA MADEIRA COM CASCA EM ÁGUA FRIA DE DIFERENTES ESPÉCIES E DO TAMANHO E FORMA DA BIOMASSA FLORESTAL, EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ESTOCAGEM

VARIÁVEL	DF EFFECT	MS EFFECT	DF ERROR	MS ERROR	F	P-LEVEL
Tempo	3	24,35	6	1,21	20,0795	0,0016
Material	2	3,04	6	1,21	2,5065	0,1617
Tempo e material	6	1,21	120	0,86	1,4083	0,2169

FONTE: O autor

TABELA 3.12 – VARIAÇÃO DA SOLUBILIDADE DA MADEIRA COM CASCA EM ÁGUA FRIA DE DIFERENTES ESPÉCIES E DO TAMANHO E FORMA DA BIOMASSA FLORESTAL, EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ESTOCAGEM (TESTE DE MÉDIAS DE TUKEY).

continua			
TIPO/FORMA X TEMPO	RC X PCC	RC X ECC	RC X C
Recém-coletado x PCC		0,0681	1,0000
Recém-coletado x ECC	0,0681		0,1697
Recém-coletado x C	1,0000	0,1697	
Média (%)	2,09a	3,31a	2,14a
TIPO/FORMA X TEMPO	DOIS MESES X PCC	DOIS MESES X ECC	DOIS MESES X C
Dois meses x PCC		0,9999	0,9943
Dois meses x ECC	0,9999		1,0000
Dois meses x C	0,9943	1,0000	
Média (%)	3,46a	3,72a	3,91a
TIPO/FORMA X TEMPO	QUATRO MESES X PCC	QUATRO MESES X ECC	QUATRO MESES X C
Quatro meses x PCC		0,9982	1,0000
Quatro meses x ECC	0,9982		0,9993
Quatro meses x C	1,0000	0,9993	
Média (%)	1,86a	2,23a	1,87a

TABELA 3.12 – VARIAÇÃO DA SOLUBILIDADE DA MADEIRA COM CASCA EM ÁGUA FRIA EM DIFERENTES ESPÉCIES E DO TAMANHO E FORMA DA BIOMASSA FLORESTAL, EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ESTOCAGEM (TESTE DE MÉDIA DE TUKEY).

TIPO/FORMA X TEMPO	conclusão		
	SEIS MESES X PCC	SEIS MESES X ECC	SEIS MESES X C
Seis meses x PCC		1,0000	1,0000
Seis meses x ECC	1,0000		1,0000
Seis meses x C	1,0000	1,0000	
Média (%)	1,62a	1,78a	1,85a

FONTE: O autor

NOTAS: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

PCC = *Pinus* com casca; ECC = *Eucalyptus* com casca; C = costaneira de *Pinus*; RC = recém-coletado

TABELA 3.13 - TESTE F PARA A SOLUBILIDADE DA MADEIRA COM CASCA EM ÁGUA QUENTE EM FUNÇÃO DA ESPÉCIE E DO TAMANHO E FORMA DA BIOMASSA FLORESTAL

DF EFFECT	MS EFFECT	DF ERROR	MS ERROR	F	P-LEVEL
2	6,6861	129	2,0010	3,3414	0,0385

FONTE: O autor

TABELA 3.14 – VARIAÇÃO A SOLUBILIDADE DA MADEIRA COM CASCA EM ÁGUA QUENTE EM FUNÇÃO DA ESPÉCIE E DO TAMANHO E FORMA DA BIOMASSA FLORESTAL (TESTE DE MÉDIAS DE TUKEY).

TIPO E GRANULOMETRIA DA BIOMASSA	<i>Pinus</i> COM CASCA	<i>Eucalyptus</i> COM CASCA	COSTANEIRA DE <i>Pinus</i>
<i>Pinus</i> com casca		0,0287	0,2729
<i>Eucalyptus</i> com casca	0,0287		0,6870
Costaneira de <i>Pinus</i>	0,2729	0,6870	
Média (%)	2,98b	3,72a	3,46ab
Mínimo (%)	0,64	1,21	0,96
Máximo (%)	5,02	7,46	6,21
Desvio padrão	1,18	1,30	1,80

FONTE: O autor

NOTA: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

TABELA 3.16 - TESTE F PARA A SOLUBILIDADE DA MADEIRA COM CASCA EM ÁGUA QUENTE DE DIFERENTES ESPÉCIES E DO TAMANHO E FORMA DA BIOMASSA FLORESTAL, EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ESTOCAGEM

VARIÁVEL	DF EFFECT	MS EFFECT	DF ERROR	MS ERROR	F	P-LEVEL
Tempo	3	10,2974	6	6,0437	1,7038	0,2647
Material	2	6,6861	6	6,0437	1,1063	0,3900
Tempo e material	6	6,0437	120	1,5833	3,8171	0,0016

FONTE: O autor

TABELA 3.17 – VARIAÇÃO DA SOLUBILIDADE DA MADEIRA COM CASCA EM ÁGUA QUENTE DE DIFERENTES ESPÉCIES E DO TAMANHO E FORMA DA BIOMASSA FLORESTAL, EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ESTOCAGEM (TESTE DE MÉDIAS DE TUKEY).

TIPO/FORMA X TEMPO	RC X PCC	RC X ECC	RC X C
Recém-coletado x PCC		0,3494	0,8602
Recém-coletado x ECC	0,3494		0,0055
Recém-coletado x C	0,8602	0,0055	
Média (%)	3,03ab	4,32a	2,08b
TIPO/FORMA X TEMPO	DOIS MESES X PCC	DOIS MESES X ECC	DOIS MESES X C
Dois meses x PCC		1,0000	0,9999
Dois meses x ECC	1,0000		1,0000
dois meses x c	0,9999	1,0000	
Média (%)	4,03a	4,25a	4,42a
TIPO/FORMA X TEMPO	QUATRO MESES X PCC	QUATRO MESES X ECC	QUATRO MESES X C
Quatro meses x PCC		0,9770	0,9980
Quatro meses x ECC	0,9770		1,0000
Quatro meses x C	0,9980	1,0000	
Média (%)	2,72a	3,39a	3,26a
TIPO/FORMA X TEMPO	SEIS MESES X PCC	SEIS MESES X ECC	SEIS MESES X C
Seis meses x PCC		0,9319	0,0309
Seis meses x ECC	0,9319		0,6310
Seis meses x C	0,0309	0,6310	
Média (%)	2,15b	2,93ab	4,09a

FONTE: O autor

NOTAS: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

PCC(*Pinus c/ casca*); ECC(*Eucalyptus c/ casca*); C(costaneira *Pinus*); RC (recém-coletado)

TABELA 3.18 - TESTE F PARA A SOLUBILIDADE DA MADEIRA COM CASCA EM HIDRÓXIDO DE SÓDIO EM FUNÇÃO DA ESPÉCIE E DO TAMANHO E FORMA DA BIOMASSA FLORESTAL

DF EFFECT	MS EFFECT	DF ERROR	MS ERROR	F	P-LEVEL
2	37,7088	129	7,0890	5,3193	0,0060

FONTE: O autor

TABELA 3.19 – VARIAÇÃO A SOLUBILIDADE DA MADEIRA COM CASCA EM HIDRÓXIDO DE SÓDIO EM FUNÇÃO DA ESPÉCIE E DO TAMANHO E FORMA DA BIOMASSA FLORESTAL (TESTE DE MÉDIAS DE TUKEY).

TIPO/FORMA DA BIOMASSA	<i>Pinus</i> COM CASCA	<i>Eucalyptus</i> COM CASCA	COSTANEIRA DE <i>Pinus</i>
<i>Pinus</i> com casca		0,0086	0,9863
<i>Eucalyptus</i> com casca	0,0086		0,0265
Costaneira de <i>Pinus</i>	0,9863	0,0265	
Média (%)	12,39b	14,00c	12,48b
Mínimo (%)	8,87	9,09	7,73
Máximo (%)	17,27	18,87	17,01
Desvio padrão	2,45	2,54	3,07

FONTE: O autor

NOTA: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

TABELA 3.21 - TESTE F PARA A SOLUBILIDADE DA MADEIRA COM CASCA EM HIDRÓXIDO DE SÓDIO DE DIFERENTES ESPÉCIES E DO TAMANHO E FORMA DA BIOMASSA FLORESTAL, EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ESTOCAGEM

VARIÁVEL	DF EFFECT	MS EFFECT	DF ERROR	MS ERROR	F	P-LEVEL
Tempo	3	30,5517	6	12,6245	2,4200	0,1644
Material	2	37,7088	6	12,6245	2,9870	0,1258
Tempo e material	6	12,6245	120	6,0790	2,0767	0,0609

FONTE: O autor

TABELA 3.22 – VARIAÇÃO DA SOLUBILIDADE DA MADEIRA COM CASCA EM HIDRÓXIDO DE SÓDIO DE DIFERENTES ESPÉCIES E DO TAMANHO E FORMA DA BIOMASSA FLORESTAL, EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ESTOCAGEM (TESTE DE MÉDIAS DE TUKEY).

TIPO/FORMA X TEMPO	RC X PCC	RC X ECC	RC X C
Recém-coletado x PCC		0,5301	0,8796
Recém-coletado x ECC	0,5301		0,0148
Recém-coletado x C	0,8796	0,0148	
Média (%)	14,24ab	16,49a	12,43b
TIPO/FORMA X TEMPO	DOIS MESES X PCC	DOIS MESES X ECC	DOIS MESES X C
Dois meses x PCC		0,6751	1,0000
Dois meses x ECC	0,6751		0,7706
Dois meses x C	1,0000	0,7706	
Média (%)	11,72a	13,76a	11,72a
TIPO/FORMA X TEMPO	QUATRO MESES X PCC	QUATRO MESES X ECC	QUATRO MESES X C
Quatro meses x PCC		0,9873	1,0000
Quatro meses x ECC	0,9873		0,9970
Quatro meses x C	1,0000	0,9970	
Média (%)	11,86 a	13,08a	11,97a
TIPO/FORMA X TEMPO	SEIS MESES X PCC	SEIS MESES X ECC	SEIS MESES X C
Seis meses x PCC		0,9988	0,7514
Seis meses x ECC	0,9988		0,9961
Seis meses x C	0,7514	0,9961	
Média (%)	11,73a	12,67a	13,81a

FONTE: O autor

NOTAS: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

PCC = *Pinus* com casca; ECC = *Eucalyptus* com casca; C = costaneira de *Pinus*; RC = recém-coletado

TABELA 3.23 - TESTE F PARA O PODER CALORÍFICO SUPERIOR DA MADEIRA COM CASCA EM FUNÇÃO DA ESPÉCIE E DO TAMANHO E FORMA DA BIOMASSA FLORESTAL

DF EFFECT	MS EFFECT	DF ERROR	MS ERROR	F	P-LEVEL
2	599305,4375	129	4400,666	136,1852	

FONTE: O autor

TABELA 3.24 – VARIAÇÃO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR DA MADEIRA EM FUNÇÃO DA ESPÉCIE E DO TAMANHO E FORMA DA BIOMASSA FLORESTAL (TESTE DE MÉDIAS DE TUKEY).

TIPO/FORMA DA BIOMASSA	<i>Pinus</i> COM CASCA	<i>Eucalyptus</i> COM CASCA	COSTANEIRA DE <i>Pinus</i>
<i>Pinus</i> com casca		2,182E-05	3,999E-02
<i>Eucalyptus</i> com casca	2,182E-05		2,182E-05
Costaneira de <i>Pinus</i>	3,999E-02	2,182E-05	
Média (kcal/kg)	4806a	4595c	4770b
Mínimo (kcal/kg)	4696	4462	4565
Máximo (kcal/kg)	4927	4748	4876
Desvio padrão	59,01	62,26	79,61

FONTE: O autor

NOTA: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey P &gt; 0,05).

TABELA 3.26 - TESTE F PARA O PODER CALORÍFICO DA MADEIRA COM CASCA DE DIFERENTES ESPÉCIES E DO TAMANHO E FORMA DA BIOMASSA FLORESTAL, EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ESTOCAGEM

VARIÁVEL	DF EFFECT	MS EFFECT	DF ERROR	MS ERROR	F	P-LEVEL
Tempo	3	18624,3730	6	16109,8	1,1561	0,4006
Material	2	599305,4375	6	16109,8	37,2013	0,0004
Tempo e material	6	16109,7988	120	3490,056	4,6159	0,0003

FONTE: O autor

TABELA 3.27 – VARIAÇÃO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR DA MADEIRA COM CASCA DE DIFERENTES ESPÉCIES E DO TAMANHO E FORMA DA BIOMASSA FLORESTAL, EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ESTOCAGEM (TESTE DE MÉDIAS DE TUKEY).

continua

TIPO/FORMA X TEMPO	RC X PCC	RC X ECC	RC X C
Recém-coletado x PCC		0,0001	0,8581
Recém-coletado x ECC	0,0001		0,0001
Recém-coletado x C	0,8581	0,0001	
Média (kcal/kg)	4788a	4542b	4743a
TIPO/FORMA X TEMPO	DOIS MESES X PCC	DOIS MESES X ECC	DOIS MESES X C
Dois meses x PCC		0,0001	0,9968
Dois meses x ECC	0,0001		0,0001
Dois meses x C	0,9968	0,0001	
Média (kcal/kg)	4806a	4615b	4779a

TABELA 3.27 – VARIAÇÃO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR DA MADEIRA COM CASCA DE DIFERENTES ESPÉCIES E DO TAMANHO E FORMA DA BIOMASSA FLORESTAL, EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ESTOCAGEM (TESTE DE MÉDIAS DE TUKEY).

TIPO/FORMA X TEMPO	QUATRO MESES X PCC	QUATRO MESES X ECC	QUATRO MESES X C
Quatro meses x PCC		0,0001	0,0005
Quatro meses x ECC	0,0001		0,0126
Quatro meses x C	0,0005	0,0126	
Média (kcal/kg)	4839a	4616c	4715b
TIPO/FORMA X TEMPO	SEIS MESES X PCC	SEIS MESES X ECC	SEIS MESES X C
Seis meses x PCC		0,0001	0,6765
Seis meses x ECC	0,0001		0,0001
Seis meses x C	0,6765	0,0001	
Média (kcal/kg)	4792a	4606b	4845a

FONTE: O autor

NOTAS: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

PCC = *Pinus* com casca; ECC = *Eucalyptus* com casca; C = costaneira de *Pinus*; RC = recém-coletado

TABELA 3.28 - TESTE F PARA O PODER CALORÍFICO LÍQUIDO DA MADEIRA COM CASCA EM FUNÇÃO DA ESPÉCIE E DO TAMANHO E FORMA DA BIOMASSA FLORESTAL

DF EFFECT	MS EFFECT	DF ERROR	MS ERROR	F	P-LEVEL
2	12868230	129	357377,1	36,0074	3,757E-13

FONTE: O autor

TABELA 3.29 – VARIAÇÃO DO PODER CALORÍFICO LÍQUIDO DA MADEIRA EM FUNÇÃO DA ESPÉCIE E DO TAMANHO E FORMA DA BIOMASSA FLORESTAL (TESTE DE MÉDIAS DE TUKEY).

TIPO/FORMA DA BIOMASSA	<i>Pinus</i> COM CASCA	<i>Eucalyptus</i> COM CASCA	COSTANEIRA DE <i>Pinus</i>
<i>Pinus</i> com casca		6,014E-05	2,182E-05
<i>Eucalyptus</i> com casca	6,014E-05		4,607E-05
Costaneira de <i>Pinus</i>	2,182E-05	4,607E-05	
Média (kcal/kg)	1774c	2305b	2891a
Mínimo (kcal/kg)	1195	1419	1515
Máximo (kcal/kg)	3269	2988	3798
Desvio padrão	480,24	494,38	824,18

FONTE: O autor

NOTA: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

TABELA 3.31 - TESTE F PARA O PODER CALORÍFICO LÍQUIDO DA MADEIRA COM CASCA DE DIFERENTES ESPÉCIES E DO TAMANHO E FORMA DA BIOMASSA FLORESTAL, EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ESTOCAGEM

VARIÁVEL	DF EFFECT	MS EFFECT	DF ERROR	MS ERROR	F	P-LEVEL
Tempo	3	8804435	6	1079070	8,1593	0,0154
Material	2	12868230	6	1079070	11,9253	0,0081
Tempo e material	6	1079070,375	120	126833,8	8,5077	1,06E-07

FONTE: O autor

TABELA 3.32 – VARIAÇÃO DO PODER CALORÍFICO LÍQUIDO DA MADEIRA COM CASCA DE DIFERENTES ESPÉCIES E DO TAMANHO E FORMA DA BIOMASSA FLORESTAL, EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ESTOCAGEM (TESTE DE MÉDIAS DE TUKEY).

TIPO/FORMA X TEMPO	RC X PCC	RC X ECC	RC X C
Recém-coletado x PCC		0,9919	0,8803
Recém-coletado x ECC	0,9919		1,0000
Recém-coletado x C	0,8803	1,0000	
Média (kcal/kg)	1479a	1646a	1741a
TIPO/FORMA X TEMPO	DOIS MESES X PCC	DOIS MESES X ECC	DOIS MESES X C
Dois meses x PCC		0,0010	0,0001
Dois meses x ECC	0,0010		0,0001
Dois meses x C	0,0001	0,0001	
Média (kcal/kg)	1545c	2204b	3056a
TIPO/FORMA X TEMPO	QUATRO MESES X PCC	QUATRO MESES X ECC	QUATRO MESES X C
Quatro meses x PCC		0,1434	0,0001
Quatro meses x ECC	0,1434		0,0001
Quatro meses x C	0,0001	0,0001	
Média (kcal/kg)	2198b	2624b	3674a
TIPO/FORMA X TEMPO	SEIS MESES X PCC	SEIS MESES X ECC	SEIS MESES X C
Seis meses x PCC		0,0001	0,0001
Seis meses x ECC	0,0001		0,5455
Seis meses x C	0,0001	0,5455	
Média (kcal/kg)	1875b	2746a	3093a

FONTE: O autor

NOTA: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).

Legenda: PCC = *Pinus* com casca; ECC = *Eucalyptus* com casca; C = costaneira de *Pinus*; RC = recém-coletado

TABELA 3.33 - TESTE F PARA O TEOR DE CINZAS EM FUNÇÃO DA ESPÉCIE E DO TAMANHO E FORMA DA BIOMASSA FLORESTAL

DF EFFECT	MS EFFECT	DF ERROR	MS ERROR	F	P-LEVEL
2	3,4275	129	0,0657	52,1932	2,467E-17

FONTE: O autor

TABELA 3.34 – VARIAÇÃO DO TEOR DE CINZAS EM FUNÇÃO DA ESPÉCIE E DO TAMANHO E FORMA DA BIOMASSA FLORESTAL (TESTE DE MÉDIAS DE TUKEY).

TIPO/FORMA DA BIOMASSA	<i>Pinus</i> COM CASCA	<i>Eucalyptus</i> COM CASCA	COSTANEIRA DE <i>Pinus</i>
<i>Pinus</i> com casca		2,18E-05	0,2143
<i>Eucalyptus</i> com casca	2,182E-05		2,182E-05
Costaneira de <i>Pinus</i>	0,2143	2,18E-05	
Média (%)	0,42b	0,85a	0,32b
Mínimo (%)	0,33	0,49	0,23
Máximo (%)	0,57	1,98	0,40
Desvio padrão	0,05	0,42	0,05

FONTE: O autor

NOTA: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).



TABELA 3.36 - TESTE F PARA O TEOR DE CINZAS DE DIFERENTES ESPÉCIES E DO TAMANHO E FORMA DA BIOMASSA FLORESTAL, EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ESTOCAGEM

VARIÁVEL	DF EFFECT	MS EFFECT	DF ERROR	MS ERROR	F	P-LEVEL
Tempo	3	0,1480	120	0,0597	2,4776	0,0646
Material	2	3,4275	120	0,0597	57,3910	3,243E-18
Tempo e material	6	0,1294	120	0,0597	2,1669	0,0508

FONTE: O autor

TABELA 3.37 – VARIAÇÃO DO TEOR DE CINZAS DE DIFERENTES ESPÉCIES E DO TAMANHO E FORMA DA BIOMASSA FLORESTAL, EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ESTOCAGEM (TESTE DE MÉDIAS DE TUKEY).

TIPO/FORMA X TEMPO	RC X PCC	RC X ECC	RC X C
Recém-coletado x PCC		0,0554	0,9961
Recém-coletado x ECC	0,0554		0,0042
Recém-coletado x C	0,9961	0,0042	
Média (%)	0,45ab	0,78a	0,34b
TIPO/FORMA X TEMPO	DOIS MESES X PCC	DOIS MESES X ECC	DOIS MESES X C
Dois meses x PCC		0,0001	0,9981
Dois meses x ECC	0,0001		0,0001
Dois meses x C	0,9981	0,0001	
Média (%)	0,41b	1,02a	0,31b
TIPO/FORMA X TEMPO	QUATRO MESES X PCC	QUATRO MESES X ECC	QUATRO MESES X C
Quatro meses x PCC		0,5431	0,9998
Quatro meses x ECC	0,5431		0,1890
Quatro meses x C	0,9998	0,1890	
Média (%)	0,39a	0,61a	0,31a
TIPO/FORMA X TEMPO	SEIS MESES X PCC	SEIS MESES X ECC	SEIS MESES X C
Seis meses x PCC		0,0001	0,9999
Seis meses x ECC	0,0001		0,0001
Seis meses x C	0,9999	0,0001	
Média (%)	0,43b	0,97a	0,35b

FONTE: O autor

NOTAS: Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey  $P > 0,05$ ).PCC = *Pinus* com casca; ECC = *Eucalyptus* com casca; C = costaneira de *Pinus*; RC = recém-coletado